

## 附件 2

# 《国家绿色低碳先进技术成果目录》 技术清单说明

## 一、水污染治理领域

### （一）城市污水短程反硝化耦合部分厌氧氨氧化深度脱氮技术

#### 1. 技术名称

城市污水短程反硝化耦合部分厌氧氨氧化深度脱氮技术

#### 2. 适用范围

城镇污水处理厂新建或升级改造。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

城镇污水首先进入生化池的厌氧区，厌氧区生物膜和污泥中的反硝化菌进行短程反硝化，将回流污泥中的硝态氮还原为亚硝态氮，生物膜上的厌氧氨氧化菌将亚硝态氮和氨氮转化为氮气；污水再进入缺氧区，生物膜和污泥中的反硝化菌进行短程反硝化，将回流硝化液中的硝态氮还原为亚硝态氮，而后生物膜中的厌氧氨氧化菌将亚硝态氮和氨氮转化为氮气；最后污水进入好氧区，氨氧化菌与亚硝酸盐氧化菌将污水中剩余的氨氮氧化为硝态氮，最终实现城镇污水短程反硝化耦合厌氧氨氧

化脱氮。生化池中装填了悬浮填料，填充率为 15%~20%。

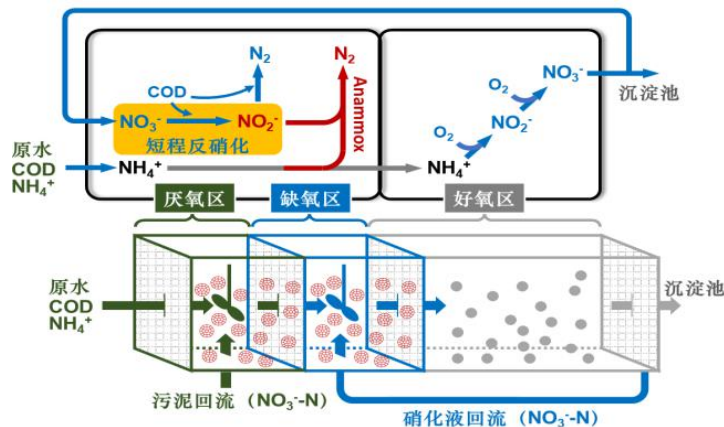


图 1 短程反硝化耦合部分厌氧氨氧化技术工作原理

3.2 主要创新点

(1) 发现并实现短程反硝化为厌氧氨氧化提供基质亚硝态氮的新途径与新思路，突破了主流城镇污水厌氧氨氧化基质难以稳定获取和厌氧氨氧化脱氮贡献率低的技术瓶颈。

(2) 提出短程反硝化耦合部分厌氧氨氧化实现城镇污水深度脱氮技术，并已工程化应用。

(3) 可在常温下大规模原位富集厌氧氨氧化菌，彻底摆脱菌群需要定期接种的限制，自养脱氮效果稳定。

(4) 在生化池中投加悬浮填料实现厌氧氨氧化菌等功能菌群高度富集，提高了脱氮效率和生化池自养脱氮比例，从而减少好氧区曝气量，减少剩余污泥产量和二氧化碳等温室气体排放。

4. 污染治理或环境修复效果

以山东省青岛市城阳城区污水处理厂和江苏省宜兴市屺亭污水处理厂为例，与传统硝化/反硝化脱氮工艺相比，该技术可节省约 30%曝气能耗，无需外加碳源，仅通过对原水中碳源的有效利用，出水总氮可削减至 10mg/L 以下。生化反应过程中减少二氧化碳和氧化亚氮等温室气体排放，从而可以减少污水处理过程碳排放。

## 5. 技术示范情况

短程反硝化耦合部分厌氧氨氧化深度脱氮技术应用于青岛市城阳城区污水处理厂升级改造工程（5 万 m<sup>3</sup>/d）和宜兴市屺亭污水处理厂升级改造工程（5 万 m<sup>3</sup>/d），均取得了较好的效果。以屺亭污水处理厂为例，主要设计参数：HRT22 h（其中厌氧区 HRT 为 5.5h，好氧区 HRT 为 8h，缺氧区 HRT 为 8.5h），MLSS 6800mg/L，最大回流比 200%。运行至今，该厂出水指标稳定达到 COD < 40mg/L，总氮 < 8mg/L，氨氮 < 0.5mg/L。该技术实现了对原水中碳源的充分利用，吨水处理费仅 0.30 ~ 0.40 元，节能降耗效果显著。生产出的高品质再生水可用于河道补水、循环冷却、市政绿化等，取得了良好的社会、经济和环境效益。

## 6. 投资估算

屺亭污水处理厂改造项目，新增填料费 1800 万元，总投资 3000 万元。

## 7. 投资回收期

屺亭污水处理厂改造项目，设备投资回收期 8.2 年（不含建

设期)。

## 8. 技术成果转化推广前景

该技术可实现污水处理厂深度脱氮，并节省药剂投加量和电耗。污水处理厂可不停产改造，在污水处理领域具有较好的市场潜力。

### (二) 膜生物反应器—超低压纳滤双膜法污水资源化技术

#### 1. 技术名称

膜生物反应器—超低压纳滤双膜法污水资源化技术

#### 2. 适用范围

水污染严重或水环境敏感地区、水资源匮乏地区。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

双膜法污水资源化技术核心为膜生物反应器(MBR)与超低压纳滤(DF)膜系统。高效脱氮 MBR 单元采用自主研发的 MBR 膜生物反应器，运用内源反硝化强化脱氮、好氧池低溶解氧( $DO < 0.5\text{mg/L}$ )、碳源精确投加等技术，深度去除污水中的氮，同时为 DF 膜系统提供足够的预处理效果，膜通量  $15\text{LMH} \sim 25\text{LMH}$ 。DF 膜作为双膜技术核心产品，能够高效去除有机物和总磷，且适度脱盐，膜通量  $17\text{LMH} \sim 24\text{LMH}$ 。该技术具有运行压力低( $0.2\text{MPa} \sim 0.4\text{MPa}$ )、产水回收率高( $>90\%$ )的特点，产水可达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) III 类标准；DF 膜系统浓水经以臭氧催化氧化处理技术为主体的浓水处理。

理单元处理后出水  $\text{COD} < 30\text{mg/L}$ ，与 DF 产水混合后出水仍能达到 GB 3838-2002 III类标准。MBR-DF 双膜法污水资源化技术路线如图 1 所示。

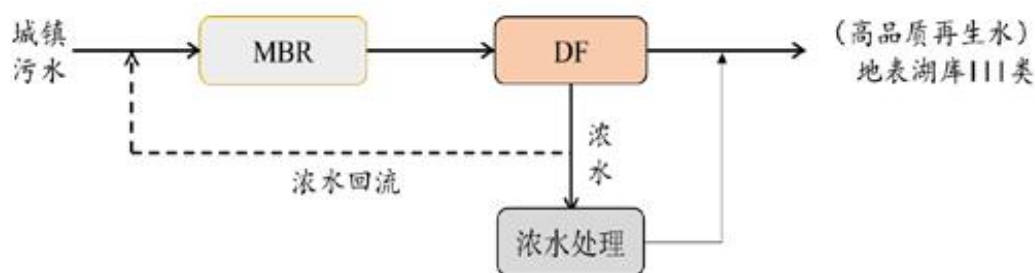


图 1 双膜法技术路线

### 3.2 主要创新点

通过改进制膜工艺，采用复合单体界面聚合技术，在复合单体中添加芳香胺类单体（如间苯二胺 MPD）调节纳滤膜通量和脱盐率的平衡关系，制备出具有选择性适度脱盐和高有机物去除率性能的纳滤膜（DF），具体包括：

（1）DF 膜对有机物、磷等截留率达 90%，与强化脱氮 MBR 协同作用，出水水质可达到 GB 3838-2002 湖库 III 类标准。

（2）基于 DF 膜选择性脱盐特性和双膜协同效应的优化设计模式，系统产水回收率达 90%。

（3）DF 系统操作压力低于  $0.4\text{MPa}$ ，能耗仅为  $0.2(\text{kW}\cdot\text{h})/\text{m}^3 \sim 0.4(\text{kW}\cdot\text{h})/\text{m}^3$ 。

（4）DF 系统总脱盐率小于 50%。浓水易处理，通过混凝沉淀、高级氧化等工艺处理后，即可达到 GB 3838-2002 IV 标准。

#### 4. 污染治理或环境修复效果

污水中有机物、磷等物质去除率 > 90%，DF 膜产水水质可达到 GB 3838-2002III类标准；DF 膜系统浓水经处理并与 DF 膜产水混合后出水可达到 GB3838-2002III类标准。与“超/微滤—反渗透”工艺对比，DF 膜工作压力下降 50%~80%，能耗降低 40%~80%，产水回收率提高 15%~20%。

#### 5. 技术示范情况

该技术已应用于北京、云南、河北、四川等地区，为改善水环境、开发新水源提供了技术支撑，具有良好的示范作用。

北京市海淀区翠湖再生水厂项目主体工艺采用 MBR-DF 双膜成套技术，MBR 段设计规模 2 万 m<sup>3</sup>/d，其中 1.3 万 m<sup>3</sup>/d 出水达到北京市《城镇污水处理厂水污染物排放标准》（DB 11/890-2012）B 类标准；其余 7000m<sup>3</sup>/d 经 DF 系统后产水主要指标浓度低于 GB3838-2002III类标准，DF 系统稳定运行压力 0.30MPa~0.38MPa，DF 系统产水回收率达到 90%，降低了工艺运行能耗。出水用于翠湖湿地补水，促进翠湖湿地形成良好的生态体系。

#### 6. 投资估算

北京市海淀区翠湖再生水厂项目工程总投资约 5400 万元，其中建筑工程费约 1000 万元，设备购置费约 2700 万元，安装工程费约 800 万元。

#### 7. 投资回收期

北京市海淀区翠湖再生水厂工程投资回收期约 13 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

到 2025 年，全国地级及以上缺水城市再生水利用率将达到 25% 以上，MBR-DF 双膜法污水资源化技术可产出稳定的高品质再生水，持续用于水系补水、景观和市政杂用等，弥补我国当前缺水现状，缓解水资源短缺和改善水环境，具有广阔的市场前景。

### （三）高效节地型生物膜污水净化技术装备

#### 1. 技术名称

高效节地型生物膜污水净化技术装备

#### 2. 适用范围

城镇污水处理厂，尤其是下沉式污水处理厂的新建或升级改造。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

如图 1 所示，正常运行时固定床和填料截留大量悬浮物，增加生物量，减少水力停留时间；当截留污染物到一定程度时，通过加大曝气量进行反洗，污水仍连续进入反应器，在曝气和水流的作用下，填料混合碰撞，截留的悬浮物和老化的生物膜脱落随水排走。运行和反洗交替进行。

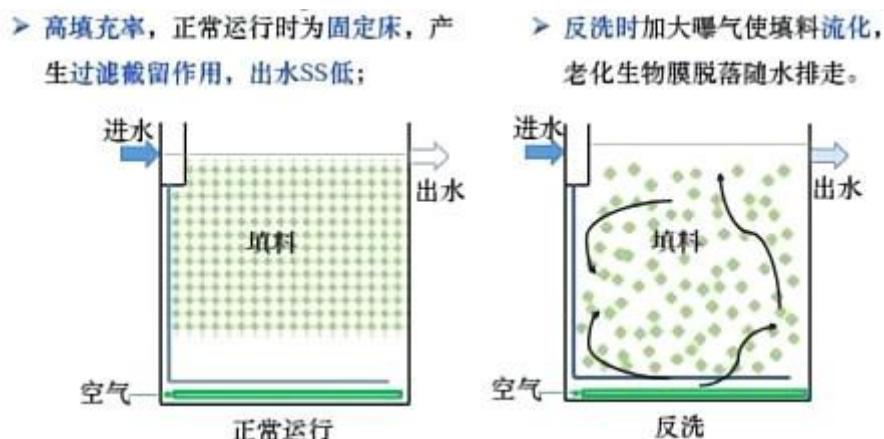


图 1 HBR 正常运行和反洗时填料状态示意图

### 3.2 主要创新点

(1) 气水比较低（通常为 2~3），曝气能耗少；采用固定床运行模式，无需填料流化；反洗频率低，反洗时间短。

(2) 填料的填充比高，反应器内生物量大，污泥浓度高，气泡的切割效果好，传质效率高，微生物群落相对独立，处理效率高。

(3) 采用与工艺配套的生物膜载体，亲水性强，比表面积大，空隙率高，结构牢固，使用寿命长。

(4) 无需设二沉池，占地省。

### 4. 污染治理或环境修复效果

与深度处理技术组合后，出水水质可稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB18918-2002）一级 A 标准，主要指标可达到 GB3838-2002 IV 类标准。生化处理单元占地可节省

30%以上。

## 5. 技术示范情况

该技术在贵阳市金百污水处理厂等 10 余座污水处理厂推广应用，根据不同污染物治理需求形成了系列化的工艺路线。该技术装备在北京通州碧水再生水厂工程中应用，出水可稳定达到 GB18918-2002 一级 A 排放标准，主要指标可达到 GB3838-2002 IV 类标准，工程的实施对缓解通州区河流污染状况具有积极作用。

贵阳市金百污水处理厂一期设计规模为  $3.0 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ ，该项目 2018 年 5 月验收，主要出水指标（COD、BOD、氨氮、总氮、总磷）稳定达到 GB18918-2002 一级 A 标准或更高标准，出水排入麦架河作为河道补水，运行费用 0.56 元/ $\text{m}^3$  污水，项目占地面积比改良 AAO 工艺减少 50%以上，节地效果明显。

## 6. 投资估算

贵阳市金百污水处理厂一期工程建设总投资 23334.65 万元，其中工程总投资 13699.40 万元。

## 7. 投资回收期

贵阳市金百污水处理厂一期工程投资回收期 12 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

该技术装备具有节地、高效、能耗低等特点，可用于城镇污水处理厂的新建或改造，在推动我国污水处理行业技术进步、促进产业结构向绿色低碳方向升级、提高水资源回用等方面具

有积极作用。

#### （四）高效节能模块装配式污水处理集成系统

##### 1. 技术名称

高效节能模块装配式污水处理集成系统

##### 2. 适用范围

中小规模城镇污水处理厂提标扩容改造、工业废水处理、黑臭水体治理、农村生活污水治理。

##### 3. 技术内容

###### 3.1 技术原理

高效节能模块装配式污水处理系统主体设备为多级环状结构，池体内通过钢结构壁板分隔出内圈和外圈两个主体部分。外圈设有曝气组件和推流装置，通过精准曝气技术调控外圈的厌氧区、缺氧区和好氧区；内圈通过三相分离器将沉淀区和好氧区叠加，形成好氧沉淀区，取代了传统的二沉池。在好氧沉淀区中，三相分离器实现气、水、污泥的分离，污水进入深度处理单元；分离后的气体由集气罩收集后形成气提，带动混合液回流。污泥直接通过重力回流至好氧区，稳定运行时模块装配式污水处理系统的污泥浓度提高至  $5.0\text{g/L} \sim 10.0\text{g/L}$ ，增强了对 COD 和氨氮的去除效果。三相分离技术上下组合式的结构使沉淀区布水方式更加均匀，沉淀区表面负荷可达  $1.5\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h}) \sim 2.5\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ，抗冲击能力强，沉淀效果好。工艺流程如图 1 所示。

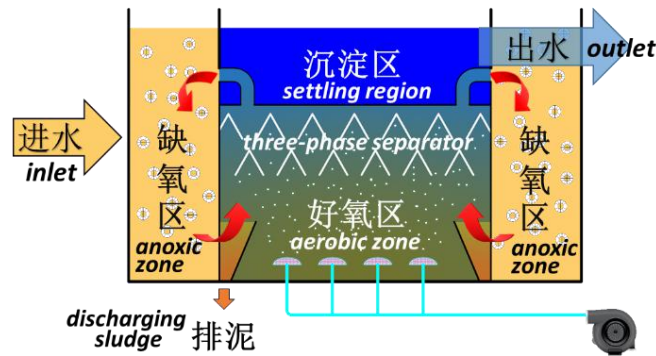


图 1 高效节能模块装配式污水处理集成系统工艺流程图

### 3.2 主要创新点

(1) 开发了无动力自循环回流及高效分离沉淀技术，减少污泥回流泵及二沉池的设置。设置特殊三相分离结构替代传统二沉池，保障出水 SS 达标，并避免产生二沉池厌氧释磷及浮泥等问题；结合气体收集系统形成的气提作用实现泥水混合液的无动力回流，有效降低能源消耗，加强泥水混合效果，提高生物处理效率。

(2) 开发了智能分组曝气控制系统实现系统的高效脱氮。外圈设置智能分组曝气控制系统及在线监控系统，根据实时监测的水质结果及系统设计的逻辑算法，适时自动调整曝气量或开关曝气组，达到设计的缺氧环境及缺氧容积，实现了系统同步短程硝化反硝化，保证了脱氮的稳定性。采用了立式、圆环集成化结构，减少外圈流态驱动力点，减少推流器的使用。

(3) 装配式组成，占地面积小，选址灵活，可采用卫星分

布模式建设。

#### 4. 污染治理或环境修复效果

可节省 20%投资、减少 2/3 占地、缩短 3/4 建设周期、降低 25%运维成本。以肇庆四会市碧海湾装配式污水处理厂项目为例，出水水质稳定达到 GB 18918-2002 一级 A 标准，吨水电耗  $0.12\text{kW}\cdot\text{h} \sim 0.14\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

#### 5. 技术示范情况

该技术已在广东、贵州、山西、湖南、北京、上海、甘肃、海南等地的污水处理项目应用。

肇庆四会市碧海湾装配式污水处理厂项目，处理规模  $10000\text{m}^3/\text{d}$ ，工艺流程为：污水提升泵站→格栅沉砂→集水井→模块化装配式污水生化处理系统→纤维转盘滤池→出水。项目占地约  $1650\text{m}^2$ ，30 天内安装调试完成，40 天内投产运营。利用智慧水务信息管理平台，可实现远程智能控制，运行自动反馈。

#### 6. 投资估算

肇庆四会市碧海湾装配式污水处理厂项目总投资 2096 万元，其中设备投资 1497.5 万元，技术寿命 50 年以上。

#### 7. 投资回收期

肇庆四会市碧海湾装配式污水处理厂项目投资回收期 2.8 年。

#### 8. 技术成果转化推广前景

该技术采用模块装配式建设方式，新建污水处理设施沿原有污水管网进行卫星式排布，或者沿用污水处理厂原有厂区与

池体进行扩容改造，既能分担污水总量压力，降低投入费用，又能合理利用城市稀缺土地资源，应用前景广阔。

### （五）全流程节能降耗精准运行控制技术

#### 1. 技术名称

全流程节能降耗精准运行控制技术

#### 2. 适用范围

污水处理厂站提标、扩容、增效及低碳运行管理。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

（1）精准除砂和排泥多参数控制技术。基于进水水量、含砂量、吸砂管位移量和粒径分布等参数确定气水比、吸砂时间和砂水分离器最佳容积，形成高效沉砂、智能提砂、精准分砂的前馈实时控制除砂技术；结合初沉池污泥浓度变化特征，采用实时污泥监控手段，形成污泥时序排泥控制技术，稳定初沉池排泥浓度和排泥总量。

（2）基于模型和大数据分析的精准控制技术。开发了基于需气量预测的负荷均衡—压力调节—溶解氧调控的精准曝气控制、基于生物/化学耦合效应自适应调节的精准除磷控制、基于污泥物料平衡的实时精准泥龄控制等技术；并建立精准曝气模型、除磷加药量模型和动态泥龄控制模型，利用大数据分析，实现自适应调整控制。

（3）全流程多因子体系实时调控技术。建立了除砂、曝气、

脱氮、除磷、初沉/剩余排泥等多因子操作单元的目标量、操作量与相关量等量化指标体系，通过指令下达、执行操作、反馈完善，实现全流程实时动态调控。

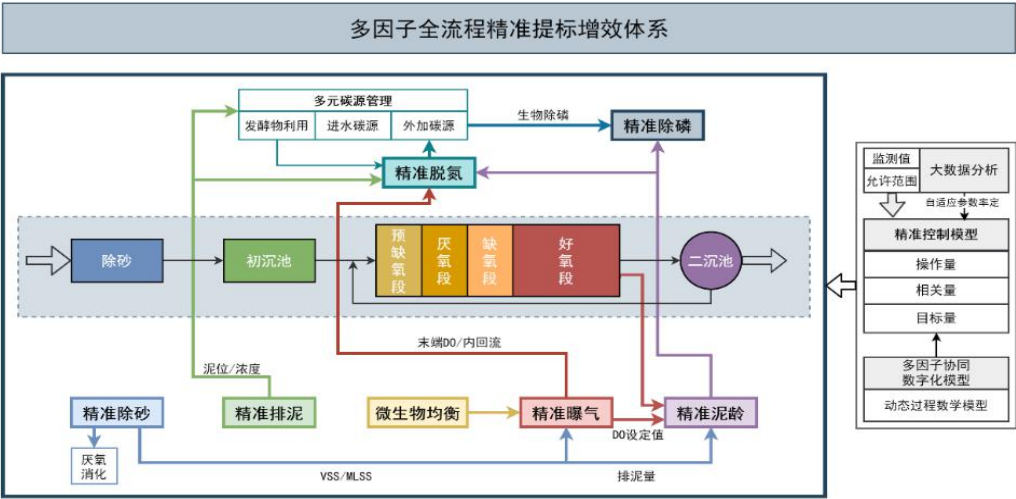


图 1 实时动态运行控制系统

### 3.2 主要创新点

（1）首创基于模型和大数据分析的系统化控制技术，填补了精准除砂和精准泥龄控制的空白，突破了全流程精准控制技术工程化应用瓶颈，破解了腐蚀性环境中在线过程稳定控制的难题，实现动态过程中的精准控制和大幅节能降耗，显著减少值守人员。

（2）针对污水处理厂进水水质水量波动剧烈、处理过程复杂多变、腐蚀性环境中仪表稳定性和可靠性难以保障等突出问题，提出了基于模型和大数据分析的自适应精准控制方法，建

立了基于目标量、操作量与相关量的多因子调控模式，开发了高效智能沉砂提砂分砂精准除砂系统、三重精准曝气控制系统、精准除磷系统、实时精准泥龄控制系统、多因子实时动态调控系统，实现了全流程精准控制。初沉池排泥浓度稳定控制在设定值 $\pm 300\text{mg/L}$ 以内，溶解氧控制在设定值 $\pm 0.2\text{mg/L}$ 以内，污泥龄控制在设定值 $\pm 12\%$ 以内。

#### 4. 污染治理或环境修复效果

实现了污水处理厂运行过程中的智能化精准控制，电耗、药耗和碳排放量降低  $10\% \sim 40\%$ 。以国内首座百万吨级污水处理厂高碑店污水处理厂原址提标项目为例，在生化池水力停留时间比常规工艺缩短  $1/3$  的条件下，技术改造后生物脱氮除磷效率显著提高，二级出水总氮降低  $50\%$ 以上。

#### 5. 技术示范情况

该技术已在北京中心城区总规模  $413$  万  $\text{m}^3/\text{d}$  的  $11$  座再生水厂应用，并辐射至雄安、南宁等地污水处理厂的提标增效项目。

率先应用于国内首座百万吨级污水处理厂高碑店污水处理厂提标改造工程，实现高碑店污水处理厂无新增占地条件下的原址提标。生物池水力停留时间比常规工艺缩短  $1/3$ ，进水污染物负荷扩容超过设计值  $25\%$ ，二级出水总氮降低  $53\%$ 以上，深度出水指标稳定达到 GB3838-2002 “准 IV 类”标准。出砂量提高了  $2.8$  倍，粒径  $\leq 0.2\text{mm}$  的细砂砾质量占比  $6.8\%$ ，去除量提高了  $160$  倍；吨水曝气电耗  $0.09\text{ kW}\cdot\text{h}$ ，降低  $38\%$ ；除磷药剂投配率降低

30%，外加碳源降低 87%，近三年累计节省电费及药费上亿元。与常规工艺相比，节省工程费用上亿元，为全国污水处理厂站提标增效工作从传统到精准转型具有示范作用。

## 6. 投资估算

以 10 万  $\text{m}^3/\text{d}$  污水处理厂为例，精准除磷控制系统投资 120 万元，精准脱氮系统投资 120 万元，精准曝气控制系统投资 280 万元，精准排泥控制系统投资 100 万元，精准泥龄控制系统投资 100 万元。

## 7. 投资回收期

精准除磷系统、精准脱氮系统、精准曝气系统投资回收期约 3 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

目前，我国在运行污水处理厂 5000 多座，处理能力近 2 亿  $\text{m}^3/\text{d}$ 。该技术在全国推广后，每年可节省用电 32 亿度、外加碳源 387 万 t（乙酸钠）、除磷药剂 363 万 t，节约运行费用 75 亿元，具有良好的经济和社会环境效益。

## （六）膜生物反应器系统高效节能膜擦洗技术与装备

### 1. 技术名称

膜生物反应器系统高效节能膜擦洗技术与装备

### 2. 适用范围

大中型污水处理厂 MBR 膜组器。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

MBR 系统高效节能膜擦洗技术通过无运动部件的纯水力学部件，将连续气流转换为脉冲/间歇式气流，累积到一定气量后在非常短时间内释放，从而形成高强度的擦洗气流，对膜丝表面形成剪切冲刷，以维持膜系统的稳定运行通量。曝气盒材料选择非金属 ABS 材料注塑加工成型，内部结构紧凑。单个曝气盒腔体容积约  $1.7 \times 10^{-3} \text{m}^3$ ，擦洗气流为每分钟 30~40 个气泡。具体过程包括：

(1) 将小的不定向连续气体供应至气体积聚室中。

(2) 排放来自气体积聚室的加压气体以释放加压的脉冲气流。

(3) 重复在气体积聚室内积聚气体。

具体工作原理如图 1 所示。

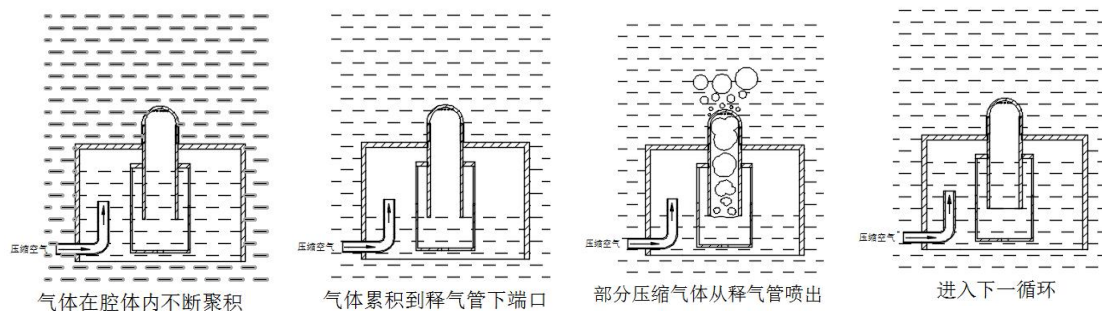


图 1 工作原理

### 3.2 主要创新点

该技术通过曝气盒独特设计的水力学部件即可实现周期性的强气体脉冲，对膜丝进行高强度的冲刷，相比穿孔管连续气

擦洗，耗气量降低 40%~60%，相比“大小气周期调节擦洗”“大的气泡连续擦洗”等技术，耗气量降低 10%~20%。利用曝气盒的水力学结构，不涉及其他相关技术的阀门、设备的动作，降低设备投资及维修成本。

#### 4. 污染治理或环境修复效果

大中型 MBR 污水处理厂中，膜擦洗气量可节省 20%~30%。在同等设备投资情况下，可显著提高 MBR 系统运行稳定性，减少 MBR 膜污染清洗频率。曝气盒材料选择 ABS 材料注塑加工成型，对环境无二次污染。

#### 5. 技术示范情况

该技术已在 9 个污水处理厂 MBR 系统中应用，对应处理规模超过 110 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ，运行效果良好。北京槐房再生水厂 C2 系列（7.5 万  $\text{m}^3/\text{d}$  MBR 系统）、D2 系列（7.5 万  $\text{m}^3/\text{d}$  MBR 系统）、A 系列和 D1（22.5 万  $\text{m}^3/\text{d}$  MBR 系统）、B 系列和 C1（22.5 万  $\text{m}^3/\text{d}$  MBR 系统）分别于 2018 年 5 月、2019 年 6 月、2020 年 9 月、2021 年 9 月采用了该技术。目前膜系统运行稳定，擦洗风量较改造前降低 20%~30%，配套风机运行数量减少，系统能耗下降。

#### 6. 投资估算

以 7.5 万  $\text{m}^3/\text{d}$  再生水厂为例，MBR 系统大强度高效节能膜擦洗装备投资约 260 万元，年经济效益 88 万元，设备寿命 10 年。

## 7. 投资回收期

以 7.5 万  $\text{m}^3/\text{d}$  再生水厂为例，设备静态投资回收期约 3 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

该技术可用于已有 MBR 系统的升级改造、新建项目 MBR 系统应用、MBR 生产厂家产品的技术升级改造，预计到 2025 年，累计应用规模可达到 1000 万  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

### （七）耐污染平板膜生物反应器

#### 1. 技术名称

耐污染平板膜生物反应器

#### 2. 适用范围

分散式污水处理（如村镇、酒店、社区、高速公路服务区、工厂化养殖等）。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

该技术利用细菌将银离子还原成直径仅 6nm 的生物纳米银，并均匀分散在铸膜液中制备成生物纳米复合膜（OXIAMEM），赋予膜持久的耐生物污染能力，可在较长时间内抑制细菌在膜表面附着、发展，抑制膜生物污染，解决了传统化学纳米粒子易在膜表面团聚的问题，提高膜表面的亲水性；同时开发了基于可控活塞流曝气的平板膜组件优化技术，优化膜组件的流态，在控制膜污染的同时降低曝气能耗。

以 100 $\text{m}^3/\text{d}$  的村镇/市政污水处理工程为例，热带地区的膜

通量设计值为  $25 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ，长江中下游地区的膜通量设计值为  $20 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ，黄河及以北地区的膜通量设计值为  $15 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

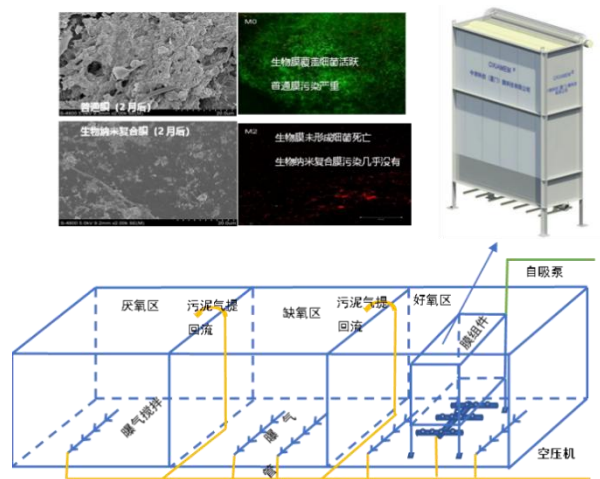


图 1 耐污染平板膜生物反应器构造及工艺路线

### 3.2 主要创新点

基于生物纳米银复合材料的 OXIAMEM 膜具有优异的耐污染性能，具体创新点包括：

（1）基于生物纳米银复合材料的 OXIAMEM 膜具有更好的亲水性和更高通量，对抑制细菌生长和延缓膜生物污染具有良好效果，在耐受极端条件等方面性能优异。

（2）OXIAMEM 膜过滤性能更优，亲水性更好，膜通量更高。

（3）采用 OXIAMEM 膜材料孔径控制关键技术，可精确控制复合膜孔径。

#### 4. 污染治理或环境修复效果

膜清洗周期超过 6 个月，出水水质稳定达到 GB18918-2002 一级 A 标准，与传统生化工艺相比，占地面积减少 50%，排泥量减少 70%。

#### 5. 技术示范情况

该设备已在北京、上海、广东、河北、安徽、内蒙古、福建等地项目中应用，污水处理总量超过 50000m<sup>3</sup>/d。以圣农集团白羽鸡养殖产业链为例，基于 OXIAMEM 耐污染平板膜组件为核心的一体化撬装设备已在福建武夷山、甘肃庆阳等地种鸡场、肉鸡笼养场的污水处理工程应用，单套设备处理规模为 50m<sup>3</sup>/d、100m<sup>3</sup>/d 和 200m<sup>3</sup>/d 不等，分别配套 OXIAMEM125-120 膜组件 1 组、2 组和 4 组，日处理污水约 3000m<sup>3</sup>/d。主体工艺为 AAO-MBR，目前已有 25 台一体化设备在养鸡场运行，出水水质稳定达到 GB18918-2002 一级 A 标准，膜组件清洗周期在 9 个月以上，出水经消毒后用于场区内部地面冲洗和清洁等，对维护养鸡场和周边农户水环境具有重要意义。

#### 6. 投资估算

以 100m<sup>3</sup>/d 一体化 MBR 设备为例，新增设备投资（包含膜组件、PLC 控制系统、泵风机阀门管道、箱体等）50 万元/套，集水池、格栅、污泥池和压滤等辅助单元 18 万元，设备使用寿命 10 年，总投资 68 万元。

#### 7. 投资回收期

以武夷山圣农种鸡场污水处理厂一体化 MBR 处理项目为例，100m<sup>3</sup>/d 一体化 MBR 设备投资回收期 1.47 年（不含建设期）。

## 8. 技术成果转化推广前景

目前，我国膜产值超过 3000 亿元，其中污水处理膜生物反应器超过 800 亿元。预计未来十年，中国膜产值年增长率超过 15%。该成果为解决我国水污染和水资源短缺提供了切实可行的技术措施，具有良好的应用前景。

### （八）纳米平板陶瓷膜污水处理技术及一体化装备

#### 1. 技术名称

纳米平板陶瓷膜污水处理技术及一体化装备

#### 2. 适用范围

中小规模工业废水和市政污水处理。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

纳米平板陶瓷膜是无机陶瓷材料经特殊工艺制备而成的非对称膜。陶瓷膜壁密布孔径约 100nm 的微孔，在抽吸外压的作用下，水等小分子透过膜，大分子物质被膜截留，从而达到分离目的。

纳米平板陶瓷膜污水处理技术及一体化装备以平板式陶瓷膜技术为核心，将膜分离技术与生物处理工艺相结合进行污水处理，实现了污水污泥同步处理、同步脱氮除磷和远程智慧管理。

主要工艺参数：水力停留时间 4h ~ 8h；污泥浓度 6000mg/L ~ 12000mg/L；过膜压差极限值  $\leq 60\text{kPa}$ 。

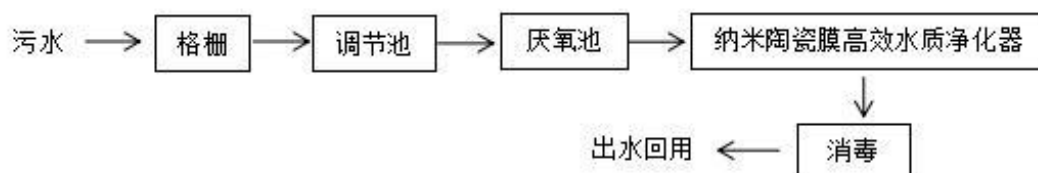


图 1 纳米平板陶瓷膜污水处理技术路线

### 3.2 主要创新点

平板陶瓷膜使用寿命长超过 15 年，对进水要求更为宽松，膜通量高，更节能。该技术可以适用不同性质的污水，尤其是一些特殊的工业废水，拓宽了膜生物反应器的应用领域。

智慧水务云平台可对污水站点实现远程监控管理。实现污水处理站点检测数据、设备状态和现场监控信息的远距离传送，在手机、电脑和监控中心大屏幕上就能看到实时情况和设备故障报警信息；可远程遥控设备的开闭状态，处理电控方面的故障，自动调节工艺参数和工况等（例如：控制膜工作和反冲洗时间，调节曝气开闭时间等）。

### 4. 污染治理或环境修复效果

处理后出水水质稳定优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB18918-2002）一级 A 标准，可直接回用于绿化用水和生态补水。与传统工艺相比，剩余污泥产生量低；与有机膜工

艺相比，膜寿命长、二次污染小、化学稳定性高，因此适用范围更广。

### 5. 技术示范情况

该一体化装备已在 6 个工业废水治理项目中应用。昭平县城北工业园集中式污水处理站项目处理规模 500m<sup>3</sup>/d，采用基于智慧管理的纳米平板陶瓷膜污水处理一体化装备，出水水质达到 GB18918-2002 一级 A 标准，2020 年 COD 去除总量为 26.17t，NH<sub>3</sub>-N 去除总量为 2.73t。

### 6. 投资估算

纳米平板陶瓷膜一体化设备及配套设施投资成本在 3000 元/m<sup>3</sup> ~ 4000 元/m<sup>3</sup>。

### 7. 投资回收期

设备投资回收期 5 ~ 8 年。

### 8. 技术成果转化推广前景

该技术装备可实现菌体共生，是一种节能高效、可远程管理的环境友好型废水处理技术，可用于协同处理矿山废水、印染废水、高浓度有机物废水、强酸碱废水等多种工业废水以及常规市政污水，与国内同类技术装备相比，具有较好的市场竞争力。

## （九）用于工业废水深度处理的超滤膜芬顿技术

### 1. 技术名称

用于工业废水深度处理的超滤膜芬顿技术

### 2. 适用范围

造纸、纺织、化工等行业工业废水，发酵废水、垃圾渗滤液,以及工业园区废水的深度处理。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

超滤膜芬顿是通过改进传统芬顿技术，并与膜过滤有机结合产生的新型高效工业废水深度处理技术，对不可生物降解的溶解性污染物等处理效果显著。膜芬顿通过取消传统芬顿的沉淀池，增加超滤膜作为固液分离单元，加上创新的平行内回流设计，形成其独有的运行参数，实现了水力停留时间与污泥停留时间的分离；运行参数范围更宽，固液分离过程不受沉降速度及沉降时间的限制，通过膜浓缩作用，维持系统高污泥浓度运行，集成混凝吸附、化学氧化、膜过滤等多种水处理技术，实现污染物 COD、TP、TSS、F 的高效去除。

该技术膜过滤精度  $0.04\mu\text{m}$ ，膜池污泥浓度  $4000\text{mg/L} \sim 8000\text{mg/L}$ ，膜通量通常为  $15\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h}) \sim 30\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。

超滤膜芬顿工艺流程如图 1 所示：

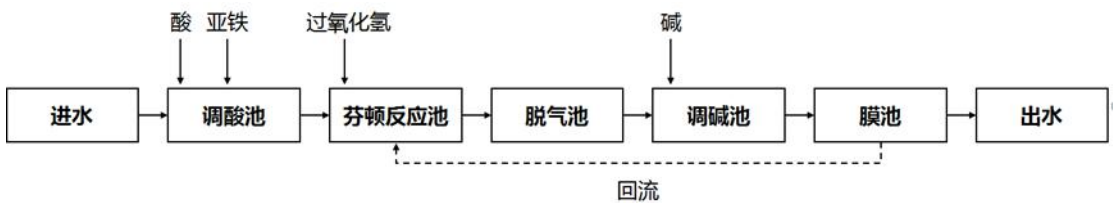


图 1 超滤膜芬顿工艺流程图

### 3.2 主要创新点

(1) 取消了传统芬顿或者流化床芬顿的沉淀池，在优化处理效果的同时大幅度减少占地面积；通过平行内回流设计，集成了同相芬顿及异相芬顿、混凝吸附、化学络合沉淀、超滤膜过滤等多种水处理技术；通过组合超滤膜工艺，利用其微小孔径的截留作用，进一步去除大分子胶体及悬浮物，保证 COD、TSS 高标准达标排放或回用。

(2) 有效控制了膜污染。一方面，芬顿试剂本身的强氧化性可有效抑制膜污染；另一方面，对不同的维护性（MC）清洗模式和清洗药剂进行优化组合，探索出可有效控制膜污染、实现长期稳定运行的最佳组合方式。

(3) 新增超滤单元的浓缩作用以及铁泥回流设计，可维持整个系统的高污泥浓度运行，提高反应底物浓度，并有效防止铁催化剂的流失，提高了高级氧化效率。

### 4. 污染治理或环境修复效果

与传统芬顿及流化床芬顿工艺相比，该工艺占地面积可节省 60%以上，COD 去除率可提升 20%~30%，芬顿试剂投加量可降低 30%~60%，排泥量可降低 30%~60%，无需投加 PAM。

### 5. 技术示范情况

广州市南沙区精细化工园区废水 2000m<sup>3</sup>/d 深度处理示范工程，主体工艺为预处理+均质池+A<sup>2</sup>O+MBR+膜芬顿。经过一级处理及二级生物处理后的污水，当 COD 为 50mg/L~200mg/L

时，利用膜芬顿技术处理 COD 可达到 GB3838-2002 的Ⅲ类水标准或 GB18918-2002 一级 A 标准；当  $TP \leq 2\text{mg/L}$  时，出水 TP 可达到 GB3838-2002 的Ⅲ类水标准。

低浓度氟离子（ $2\text{mg/L} \sim 10\text{mg/L}$ ）去除率达 70%，SS 未检出。工艺运行稳定，可自动化运行，实现无人值守。

## 6. 投资估算

按照处理规模及系统配置完善程度的差异，吨水建设投资 900 ~ 1700 元。

## 7. 投资回收期

静态投资回收期 1.6 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

自 2018 年启动超滤膜芬顿示范工程以来，已在多个地区、多个水厂启动膜芬顿应用项目建设。该工艺对难降解污染物处理效果显著，充分满足了国内外日益严格的环境要求，且节能降耗，可实现资源的综合利用。随着工业废水深度处理要求与日俱增、现有污水处理厂的提标改造，以及水回用率要求的提升，释放了巨大的市场潜力，超滤膜芬顿技术具有较好的工业化应用前景。

## （十）污水深度处理臭氧催化氧化技术

### 1. 技术名称

污水深度处理臭氧催化氧化技术

### 2. 适用范围

市政污水处理厂提标改造、工业园区高浓度难降解废水深度处理。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

污水深度处理臭氧氧化技术由以下两大核心技术组成：

##### （1）高效溶气技术

该技术主要通过电磁（EM）切变场将污水中水分子和污染物分子的团簇结构打破，形成更小的团簇结构，同时水中各种离子受电流脉冲作用，改变了待处理污水的物理、化学、分子力学等各方面性能，由于水分子团簇结构变小，水分子之间的作用力发生改变，气体在水中的溶解度也随之发生改变，从而提高了臭氧溶气效率。此外，由于污染物分子的团簇结构被打破，形成了更小的团簇结构，加快了与臭氧分子和羟基自由基的生化反应速率。

##### （2）高效催化技术

该技术包括非均相催化和均相催化，非均相催化剂在制备过程中加入了稀土金属（稀土催化通用单体选择性配位聚合，可以精确控制链结构），与过渡金属经过高温焙烧后形成金属氧化物，作为催化剂，将吸附在其表面的臭氧分子分解生成羟基自由基，提高臭氧对污水中难降解有机物的处理效率。均相催化是通过微电解过渡金属极板，直接在水中产生新生态离子催化剂，促使臭氧分解生成羟基自由基，提高对污水中难降解有

机物的处理效率。

非均相催化剂比表面积  $200 \text{ m}^2/\text{g} \sim 1000 \text{ m}^2/\text{g}$ ，使用寿命超过 10 年，均相催化通过微电解技术，可在污水中精准投加  $\mu\text{g}/\text{L}$  量级的金属离子。该技术不产生污泥，操作简便。

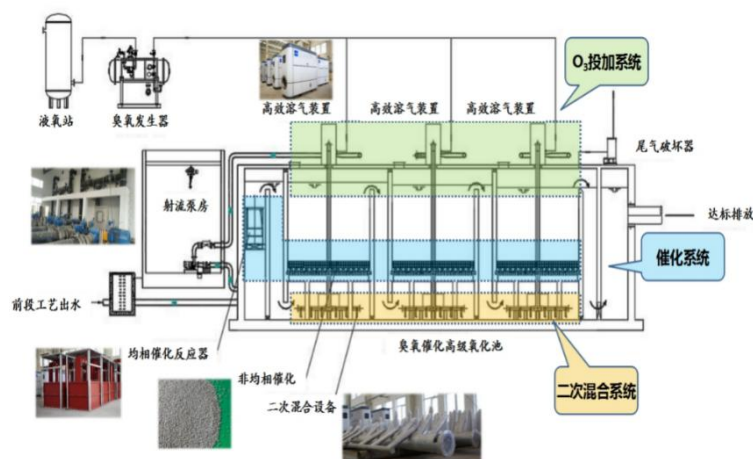


图 1 臭氧催化氧化工艺流程图

### 3.2 主要创新点

(1) 运行过程中只消耗氧气和电能，只产生  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$ ，无二次污染。

(2) 臭氧的利用率可达 95% 以上；非均相催化剂具有良好的催化效果，使用寿命超过 10 年；均相催化通过自主开发的微电解技术，可实现在污水中精准投加  $\mu\text{g}/\text{L}$  量级的金属离子，不产生污泥，操作简便快捷。

(3) 出水 COD 符合甚至优于 GB18918-2002 一级 A 标准 ( $\text{COD} \leq 50\text{mg}/\text{L}$ )。

#### 4. 污染治理或环境修复效果

臭氧的利用率可达 95% 以上，处理后出水 COD 浓度  $\leq 50\text{mg/L}$ 。与传统技术相比，运行成本节省 50%，占地面积节省 50%；达标尾水中富含溶解氧，可作为河湖补给水源，增强河湖水体自净修复能力，具有良好的生态效益。

#### 5. 技术示范情况

该技术已有近 80 个工程项目。无锡市锡山水务有限公司云林厂提标改造工程，设计处理规模 6 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ，管网服务范围  $21.8\text{km}^2$ ，污水处理厂 60% 的废水主要为工业区排放的工业废水，具有成分复杂、有机污染物含量高、碱性大、水质变化大等特点，在工艺末端采用臭氧催化高级氧化技术处理后，出水水质可达到 GB3838-2002 准IV类标准，尾水排入北兴塘河作为河道补给水源。

#### 6. 投资估算

某污水处理厂 60 万  $\text{m}^3/\text{d}$  脱色工程，进水主要为制药废水，COD 由  $70\text{mg/L}$  降至  $50\text{mg/L}$ ，设备整体工艺包需投资约 1350 万元。某 1.2 万  $\text{m}^3/\text{d}$  污水处理厂提标改造项目，工程投资 3800 万元。

#### 7. 投资回收期

以某污水处理厂 1.2 万  $\text{m}^3/\text{d}$  提标改造项目为例，项目静态回收期约 13 年。

#### 8. 技术成果转化推广前景

该技术为我国市政污水处理提供了有效的解决方案并已在  
全国多个万吨级规模的污水处理厂升级改造中应用，应用地域  
涵盖了华北、东北、华东、华中、华南、西南地区，推广应用  
前景良好。

## （十一）大型二氧化氯制备系统及纸浆无元素氯漂白关键技术

### 1. 技术名称

大型二氧化氯制备系统及纸浆无元素氯漂白关键技术

### 2. 适用范围

制浆造纸行业清洁生产。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

##### （1）综合法二氧化氯制备技术

$\text{NaCl}$  溶液在  $\text{NaClO}_3$  电解槽中经电解反应生成浓  $\text{NaClO}_3$  溶液和氢气，氢气经过冷却除水后送  $\text{HCl}$  合成单元，与  $\text{ClO}_2$  生成单元产生的弱氯气燃烧合成制备 32% 盐酸。

浓  $\text{NaClO}_3$  溶液与 32% 盐酸泵送至二氧化氯发生器反应生成  $\text{ClO}_2$  气体。该气体冷凝后去吸收/提气塔被冰水吸收后，制得  $9\text{g/L} \sim 11\text{g/L}$   $\text{ClO}_2$  水溶液，气提出来的弱氯气送至  $\text{HCl}$  合成单元使用。发生器反应残液（含氯化钠）返回  $\text{NaClO}_3$  电解单元循环使用。

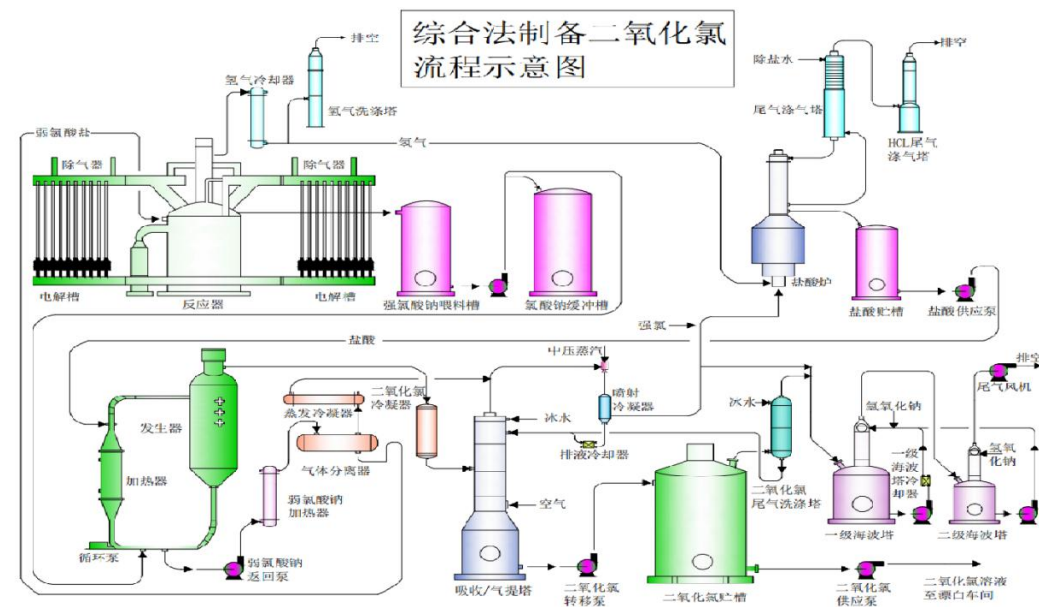


图 1 综合法制备二氧化氯流程图示意图

## (2) 还原法

原料浓  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NaClO}_3$ 、还原剂溶液进入发生器反应生成  $\text{ClO}_2$ 。 $\text{ClO}_2$  气体冷凝后进入吸收塔，被冰水吸收制成  $9\text{g/L} \sim 11\text{g/L}$   $\text{ClO}_2$  水溶液。

反应产生的副产品酸性芒硝进行洗涤浓缩，滤液返回发生器循环反应，酸性芒硝晶体进行复分解反应转化成中性芒硝。中性芒硝洗涤浓缩后的酸液返回发生器回收硫酸，中性芒硝晶体溶解或干燥后供碱回收车间使用或外售。

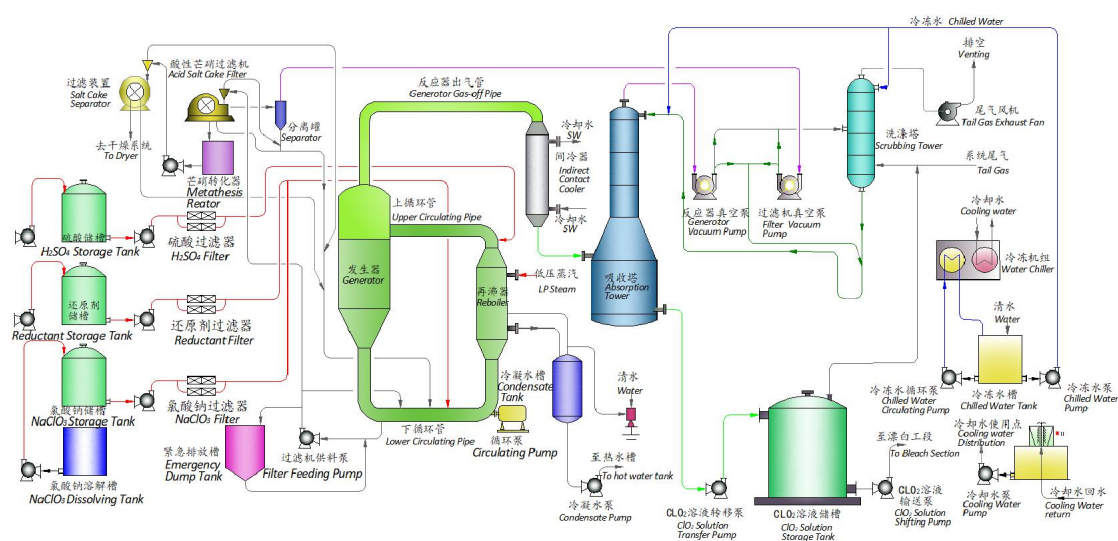


图2 还原法制备二氧化氯流程示意图

## 3.2 主要创新点

### 3.2.1 综合法

(1) 在二氧化氯生成与氯酸钠电解工段之间采用氯酸钠溶液调质控制，消除了因生产波动带来的工段间彼此干扰。

(2) 二氧化氯生成效率从 90.0% 提高到 93.5%，纯度从 90.0% 提高到 98.0%。

(3) 采用气提循环电解系统及设计优化的电解槽和直接载流技术，电解效率高达 95%，氧含量低于 2.6%。

### 3.2.2 还原法

(1) 氯酸钠转化率比传统工艺提高 2%，氯气含量降低 50% ~ 60%。

(2) 副产物酸性芒硝转化成中性芒硝回收使用，酸用量比传统工艺降低 17%，无固废和废液外排。

#### 4. 污染治理或环境修复效果

两种工艺制备的二氧化氯氯气含量低，应用于制浆造纸企业，处理后废水 AOX 含量可达到《制浆造纸工业水污染物排放标准》（GB3544-2008）要求，比传统工艺的漂白废水 AOX 降低 33%以上。副产物酸性芒硝转化成中性芒硝回收使用，系统酸消耗减少，避免了固废和废液外排。

#### 5. 技术示范情况

已在国内外 40 多家企业推广应用，应用企业累计生产漂白纸浆 700 多万 t。广西贵糖（集团）股份有限公司无元素氯漂白技改工程项目，建设了一套 8t/d 还原法二氧化氯制备系统，应用于 270t/d 漂白浆生产线。APP 集团海南金海浆纸有限公司综合法二氧化氯制备项目，建设了一套 35t/d 综合法二氧化氯制备系统，应用于该公司的扩产漂白浆生产线。企业的废水排放 AOX 均达到《制浆造纸工业水污染物排放标准》（GB3544-2008）要求。

#### 6. 投资估算

广西贵糖（集团）股份有限公司（8t/d）无元素氯漂白技改工程项目总投资 1885 万元，其中设备投资 1644 万元。

#### 7. 投资回收期

广西贵糖（集团）股份有限公司（8t/d）无元素氯漂白技改工程项目投资回收期约 3 年。

#### 8. 技术成果转化推广前景

我国有 3000 多家制浆造纸企业，国外印度、印尼等一些制

浆造纸发达国家新建制浆项目也需配套二氧化氯制备系统。大型二氧化氯制备系统可完全替代进口设备技术，具有良好的推广应用前景。

## （十二）含重金属废水纳米吸附深度处理技术

### 1. 技术名称

含重金属废水纳米吸附深度处理技术

### 2. 适用范围

含砷、锑、铅、镉、铊等重金属废水的深度处理。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

基于稀土元素变价特性，采用离子交换吸入和化学反应方法，在树脂基质表面负载具有新型物质结构的纳米级水合氧化铁和水合氧化锰颗粒，重金属通过表面羟基的化学吸附作用去除。由于吸附剂表面物质的特性，使其在酸性或碱性条件下具有强大的再生能力。

含铅、镉、砷和锑重金属废水经调节池收集后，经机械过滤器处理，去除废水中的悬浮颗粒物等污染物。过滤出水依次进入除铅镉吸附柱和除砷锑吸附柱，深度去除废水中铅、镉、砷和锑等离子，最终超低排放或回用。纳米吸附剂运行一段时间后需进行脱附再生，脱附过程中产生的脱附液含有较高浓度的重金属，进入厂区重金属废水处理系统进行初步处理。除铅、镉、砷和锑工艺过滤速度 8m/h，处理流速 7Bv/h ~ 9Bv/h（除铅、

镉)，处理流速 11Bv/h ~ 13Bv/h（除砷、锑）。

含铊废水首先进入高级氧化处理池，在高级氧化剂作用下，一价铊变为三价铊，然后进入机械过滤器处理，去除废水中的悬浮颗粒等污染物，保障后端纳米吸附柱的运行安全。过滤出水进入除铊吸附柱，深度去除废水中铊离子，处理后出水超低排放或回用。纳米吸附柱运行一段时间后需要进行脱附再生，脱附过程中产生的脱附液进入厂区重金属废水硫化处理系统进行初步处理。除铊工艺过滤速度 8m/h，处理流速 4Bv/h ~ 6Bv/h。

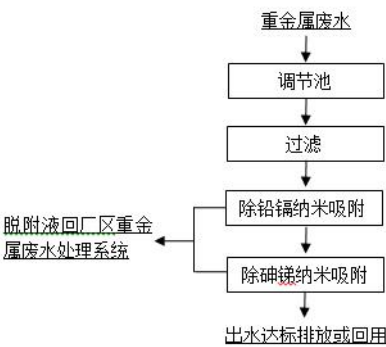


图 1 纳米吸附剂除铅、镉、砷和锑工艺路线

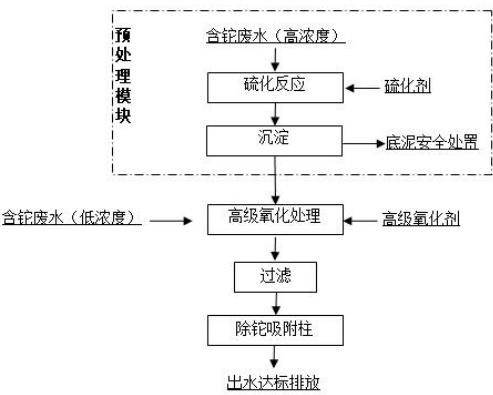


图 2 纳米吸附剂除铊工艺路线

### 3.2 主要创新点

基于稀土元素变价特性，开发了重金属阳离子吸附剂、除砷锑吸附剂和除铊吸附剂 3 类新型复合纳米吸附剂，与同类重金属吸附剂相比，吸附容量、再生率和使用寿命分别提高 15%、10% 和 30%以上。

针对重金属阳离子吸附剂和除砷锑吸附剂的特性，开发出复合纳米吸附深度处理重金属（铅、镉、砷和锑）新工艺，出水中铅、镉、砷等重金属指标可稳定达到 GB3838-2002III类标准限值要求。

基于铊离子的变价特性，开发出了高级氧化和纳米吸附耦合深度处理新工艺，出水中铊离子浓度能够稳定达到《铅锌工业污染物排放标准》（GB25466-2010）（含修改单）和最严格的地方排放标准。

### 4. 污染治理或环境修复效果

原水中铅、镉、砷、锑、铊等污染物浓度为行业排放标准限值 1~2 倍范围内时，处理后出水铅、镉、砷可稳定达到《地表水环境质量标准》（GB 3838-2002）III类标准值，出水锑 $\leq 0.005\text{mg/L}$ 、铊 $\leq 0.002\text{mg/L}$ 。

### 5. 技术示范情况

广西壮族自治区河池市车河选矿厂选矿废水深度处理工程，处理规模  $1200\text{m}^3/\text{d}$ （ $50\text{m}^3/\text{h}$ ），采用“机械过滤+重金属（铅、镉等）吸附+砷吸附”工艺深度处理尾矿库溢流水，处理后出

水中砷离子浓度 $\leq 0.05\text{mg/L}$ 、镉离子浓度 $\leq 0.005\text{mg/L}$ 、铅离子浓度 $\leq 0.05\text{mg/L}$ 、锌离子浓度 $\leq 1\text{mg/L}$ 、铜离子浓度 $\leq 1\text{mg/L}$ ，满足相应排放标准要求，具有较高的环境效益和社会效益。

## 6. 投资估算

广西壮族自治区河池市车河选矿厂选矿废水深度处理工程总投资 400 万元。

## 7. 技术成果转化推广前景

该技术已在国内多个工程应用，与同类技术相比，技术经济性优势明显。“十四五”期间将有较大的重金属废水深度处理的材料和技术需求，该技术可实现重金属污染物稳定达标排放，具有良好的应用前景。

### （十三）基于有机—无机复合药剂的重金属深度去除技术

#### 1. 技术名称

基于有机—无机复合药剂的重金属深度去除技术

#### 2. 适用范围

含重金属污（废）水处理。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

该技术构建的有机—无机复合药剂（iCOM）以腐殖酸等水溶性有机物为基底，并包含 $-\text{NH}-\text{CH}=\text{S}$ 、 $-\text{CH}=\text{SH}-$ 、 $-\text{CH}_2-\text{SH}-$ 和 $-\text{CH}_2-\text{NH}-\text{CH}_2-$ 活性官能团。材料的活性官能团与水中游离态重金属快速螯合，螯合后的游离态重金属由水相溶解态相变为

胶体束缚态，继而投加 PAC 或 PAM 混凝剂，促使胶体态物质发生团聚，形成的絮凝体易于从水中分离。通过构建基于“螯合一凝胶—混凝沉淀”多过程的耦合实现水中低浓度游离态重金属的去除。

基于有机—无机复合药剂的重金属深度去除技术由加药系统和辅助调控系统组成（工艺路线如图 1）。在实施过程中，首先在初沉池投加混凝剂去除水中悬浮态重金属，可依据污水处理厂实际运行工况及进水重金属浓度，选择在污水处理厂初沉池、二沉池前或高效沉淀池前投加 iCOM 复合药剂并控制药剂投量，利用其螯合作用可快速将水中溶解态重金属捕获，重金属由溶解态变成胶体束缚态。最终利用已有混凝沉淀工艺，实现游离态重金属离子的“螯合一凝胶—絮凝分离”的多过程耦合，出水重金属达标。iCOM 复合药剂投加量为重金属污染物浓度的 5~10 倍。工艺路线如图 1 所示。

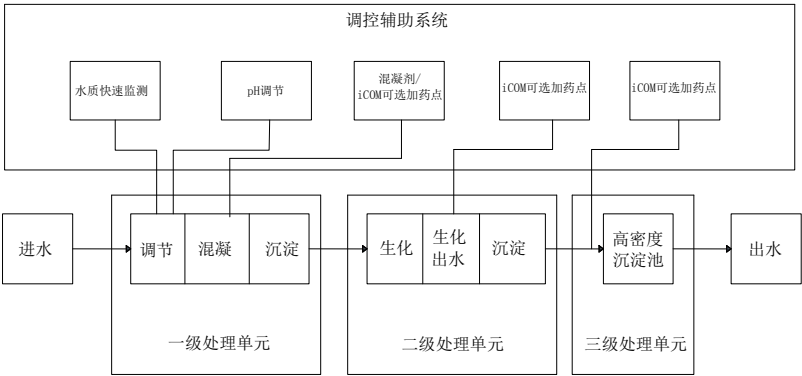


图 1 基于有机—无机复合药剂的重金属深度去除技术工艺路线

### 3.2 主要创新点

(1) 构造了具有多种活性官能团的有机—无机复合药剂，可在复杂水质条件下通过螯合等作用高效捕获污水中低浓度重金属。

(2) 通过调控重金属捕获剂与低浓度重金属的螯合，实现捕获剂和重金属由溶解态向胶体态的转变。

(3) 创建了基于有机—无机复合药剂的“螯合—凝胶—混凝沉淀”多过程耦合的重金属深度处理技术。

### 4. 污染治理或环境修复效果

$\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 和  $\text{Pb}^{2+}$ 等重金属浓度在  $0.2\text{mg/L} \sim 2\text{mg/L}$  时，投加 iCOM 复合药剂后，出水重金属浓度可达到 GB18918-2002 中一类污染物及选择性控制项目的标准要求。对于高浓度重金属阳离子，增加药剂投量即可保证出水达标。

### 5. 技术示范情况

以东部沿海某污水处理厂为例，进水中镍浓度经常在  $0.2\text{mg/L} \sim 1.8\text{mg/L}$  波动，在生化池出水末端（二沉池进水前端）投加有机—无机复合药剂（iCOM）后，无需对原有工艺进行调整或增加处理单元，污水处理厂出水总镍浓度可稳定低于  $0.05\text{mg/L}$ ，达标率 100%。

### 6. 投资估算

以  $15\text{万 m}^3/\text{d}$  污水处理厂为例，无需大规模工程改造，新增加药系统即可，加药系统设备投资约 40 万元。

## 7. 技术成果转化推广前景

我国城镇污水处理率已达 99%，现有污水处理厂均未设重金属去除工艺。当涉重金属聚集区域的城镇污水处理厂上游企业出现生产事故、偷排漏排重金属废水时，重金属超标风险较大。该技术投资及运行费用低，无需大规模工程建设，为城镇和工业园区污水处理厂重金属污染物达标排放提供了简单、经济、高效的技术措施，未来市场潜力较大。

### （十四）基于离子膜的移动式高盐有机废液处置技术及装置

#### 1. 技术名称

基于离子膜的移动式高盐有机废液处置技术及装置

#### 2. 适用范围

煤化工、造纸行业、油田钻采、电镀的废水废液的处理。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

以典型工业行业产生的浓盐水为目标，采用两段电驱膜（ED）+反渗透膜（SWRO）耦合工艺，实现盐水分离。脱盐水满足锅炉补充水品质，高浓缩盐水进一步采用盐硝分质结晶工艺实现硫酸钠、氯化钠的分质结晶，脱盐水回用于循环系统补充水。该技术常温、常压、能耗低，可实现盐水高效分离。设备模块化设计参数：废液流量 5m<sup>3</sup>/h，脱盐水回收率 > 85%。

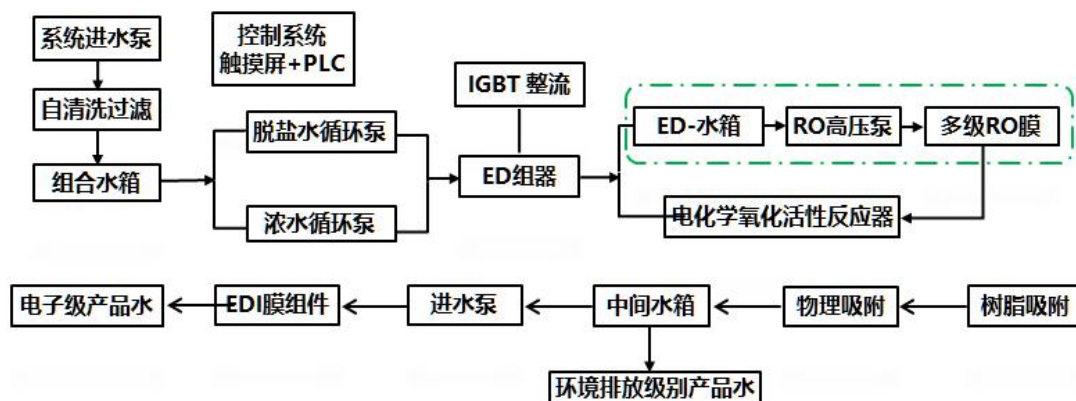


图 1 基于离子膜的移动式高盐高有机废液处置工艺流程

### 3.2 主要创新点

（1）面向不同的复杂水质，开发了优化抗污染离子膜及具有特殊适应性的电驱离子膜元件结构，实现了适用于工业高盐废水及反渗透浓水的电驱离子膜堆成套化、系列化生产。

（2）开发了与工业生产工艺高度耦合的废水浓缩回用系统工艺，浓缩盐水达到经济化指标，解决了传统方法盐水处理难的问题，实现工业废水的资源化利用。

（3）针对高 COD、高硬度的工业废水，开发了针对性较强的高效系统集成工艺，实现了重污染废水的近零排放。

## 4. 污染治理或环境修复效果

该技术脱盐水指标达到  $TDS \leq 500\text{mg/L}$ （达到工业新鲜水回用标准）， $SS \leq 1\text{mg/L}$ 。排放水质可替代工业新鲜用水，实现了工业高盐废液/废水的近零排放。

与机械式蒸汽再压缩技术（MVR）、碟管式反渗透膜（DTRO）相比，工艺路线简单，投资成本只有前者的 40% ~ 60%，可现场直接撬装，更适合于点源治理。

## 5. 技术示范情况

2014—2022 年期间，该技术在中科宝桦新材料项目煤化工废水浓缩工段总包项目（硫酸钠浓缩浓度 200g/L）、国电集团邯郸热电厂脱硫废水零排放项目（硫酸钠浓缩浓度 150g/L）、阳煤集团寿阳化工有限公司（国内第一套 20 万 tDMO、日本宇部兴业工艺包）ED 硝酸钠浓缩工段分包、内蒙古乌兰浩特兴安盟大化零排放工程等项目中应用。2014 年江苏南通经济开发区二期 3.5 万 m<sup>3</sup>/d 中水回用工程项目，浓盐水单元在浓度 140g/L 长期稳定运行，工艺简单，能耗 8.5(kW·h)/m<sup>3</sup>，运行费用 5.5 元/m<sup>3</sup>。

## 6. 投资估算

成套设备吨水投资约 20 万元/m<sup>3</sup>。

## 7. 技术成果转化推广前景

我国工业行业高盐废水排放量大、污染严重，传统处理工艺存在一定局限。该技术为化工工艺含盐废水及工业采矿湿法冶金排放的重金属盐水无害化、资源化处理，尤其对煤化工行业的含盐废水处理提供了切实可行的解决方案，具有较好的推广应用前景。

# （十五）高氨氮废水厌氧氨氧化高效低碳脱氮技术

## 1. 技术名称

# 高氨氮废水厌氧氨氧化高效低碳脱氮技术

## 2. 适用范围

污泥消化液、垃圾渗滤液、养殖废水、餐厨发酵液、半导体废水、煤化工废水、制药废水、食品废水等行业高氨氮废水的处理。

## 3. 技术内容

### 3.1 技术原理

厌氧氨氧化过程见反应式（1），厌氧氨氧化实现高效脱氮的机理如图 1 所示。

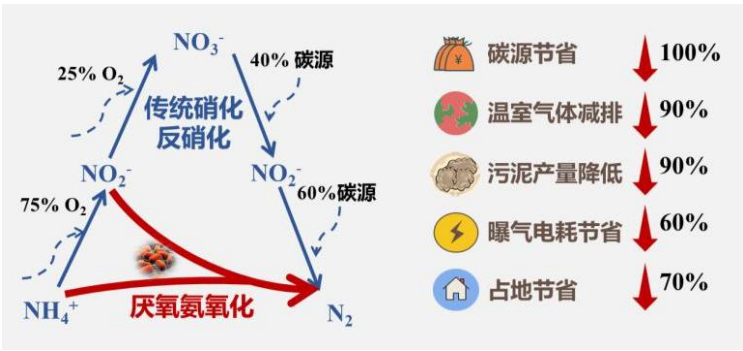
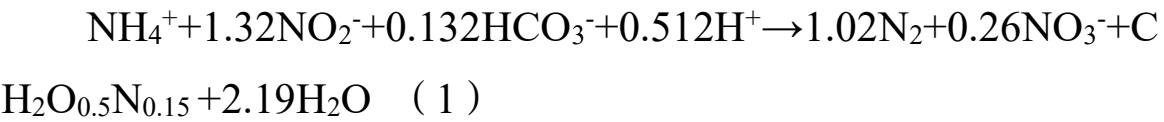


图 1 厌氧氨氧化原理与优势

针对低 C/N 废水和波动 C/N 废水分别开发了厌氧氨氧化脱氮工艺路线，如图 2 和图 3 所示。该技术脱氮负荷  $0.4\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d}) \sim 0.8\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ ，为传统脱氮负荷的 2~4 倍。

### (1) 低 C/N 废水厌氧氨氧化脱氮工艺路线

低 C/N 废水厌氧氨氧化脱氮工艺包括调节池、混凝池、斜板沉淀单元、水质精准预调控单元、厌氧氨氧化（RENOCAR）脱氮单元以及平流沉淀池。

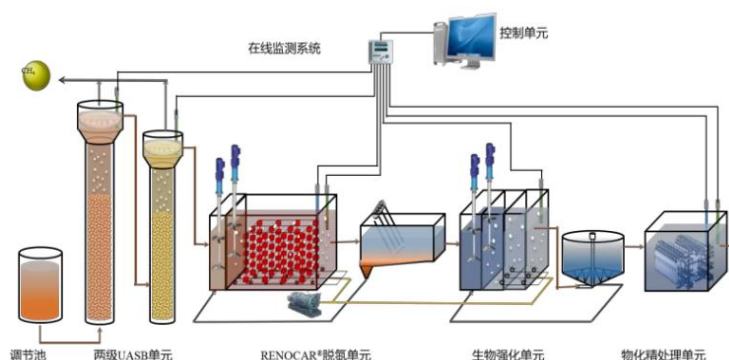


图 2 低 C/N 废水厌氧氨氧化脱氮工艺路线

### (2) 波动 C/N 废水厌氧氨氧化脱氮工艺路线

波动 C/N 废水厌氧氨氧化脱氮工艺包括调节池、两级 UASB、RENOCAR 脱氮单元、生物强化单元和物化精处理单元。

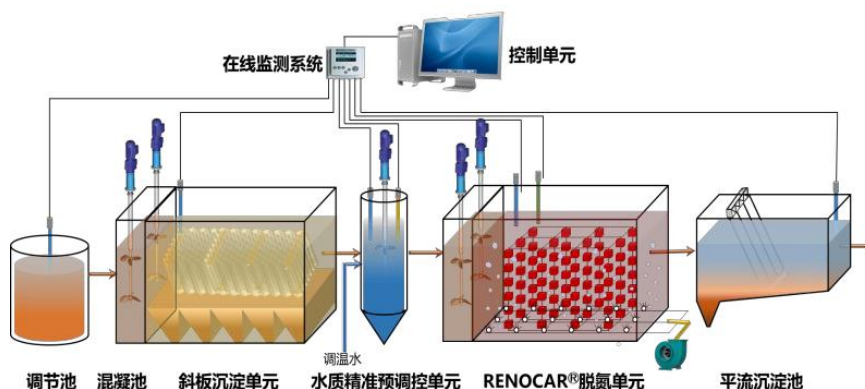


图 3 波动 C/N 废水厌氧氨氧化脱氮工艺路线

### 3.2 主要创新点

(1) 突破了厌氧氨氧化工程化应用瓶颈，建成了世界最大规模的污水处理厂旁侧厌氧氨氧化脱氮工程。

(2) 建成了世界首座垃圾渗滤液厌氧氨氧化脱氮工程。

(3) 实现了厌氧氨氧化菌工程化培养并建成了全球最大的菌种基地。

(4) 开发了废水 RENOCAR 脱氮技术体系（见图 4），研制了多项关键核心装备，实现了厌氧氨氧化脱氮技术体系的装备成套化。

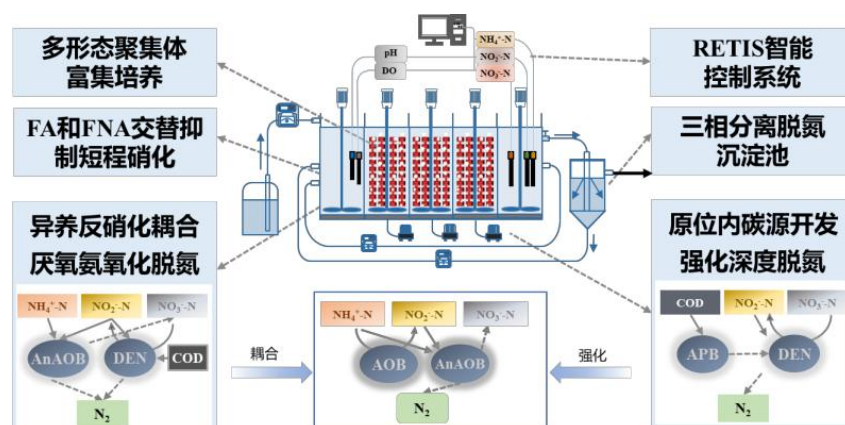


图 4 高氨氮废水厌氧氨氧化新型高效脱氮工艺

### 4. 污染治理或环境修复效果

TN 去除率 85%~95%， $\text{CO}_2$  减排 90%，曝气电耗节省 60%，碳源药剂节省 100%，占地面积节省 70%。可显著降低水体赤潮、

水华、黑臭等发生的风险，并提供高品质再生水。

## 5. 技术示范情况

已建设并稳定运行 7 座厌氧氨氧化工程设施，主要应用在北京市，总处理水量 16850m<sup>3</sup>/d。

高安屯热水解污泥消化液厌氧氨氧化脱氮工程，处理规模 4600t/d，设计进水总氮浓度 1600mg/L，氨氮浓度 1500mg/L，采用“调节池—混凝池—斜板沉淀池—水质精准预调控单元-RENOCAR 脱氮单元—平流沉淀池”工艺路线，运行以来，出水氨氮平均为 50mg/L，总氮去除率达 90%，总氮去除负荷 0.3kg/(m<sup>3</sup>·d) ~ 0.5kg/(m<sup>3</sup>·d)。

## 6. 投资估算

高安屯热水解污泥消化液厌氧氨氧化脱氮工程设备投资 2900 万元。

## 7. 投资回收期

高安屯热水解污泥消化液厌氧氨氧化脱氮工程投资回收期约 2 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

与传统脱氮工艺相比，该技术高效、稳定、抗冲击能力强，并可大量减少温室气体排放，污泥产量少，节省占地面积。据不完全统计，全国高氨氮废水总氮量约 400 万 t/a，如 30%采用厌氧氨氧化技术处理，可节省建设投资 360 亿元，每年节省脱氮处理费用 288 亿元，具有广阔的应用前景。

## （十六）高盐高浓度氨氮废水气态膜法处理技术

### 1. 技术名称

高盐高浓度氨氮废水气态膜法处理技术

### 2. 适用范围

高盐、高氨氮废水处理。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

该技术基于气态膜法的关键工艺技术，开发了活性炭吸附—金属基助凝脱水去除胶质体技术吸附废水中的胶体，并通过金属基助凝剂高效絮凝脱水；发明了次氯酸钙深度氧化 COD 并协同除氟技术协同深度脱除 COD 和氟；发明了弱碱条件下金属离子硅基吸附去除材料，形成了与气态膜法匹配的预处理技术。研制了抗污染、再生性能高的膜丝材料，利用气态膜透气不透水的特性高效脱除氨氮，同时回收氨氮，生产副产物硫酸铵。工艺分为五个工段：酸性过滤、中和沉淀、碱性过滤、膜处理、污泥浓缩。氨氮浓度可从进水 10000mg/L 左右去除至  $< 15\text{mg/L}$ ，单支膜最大脱氨率可达 1.77%。工艺流程如图 1 所示。

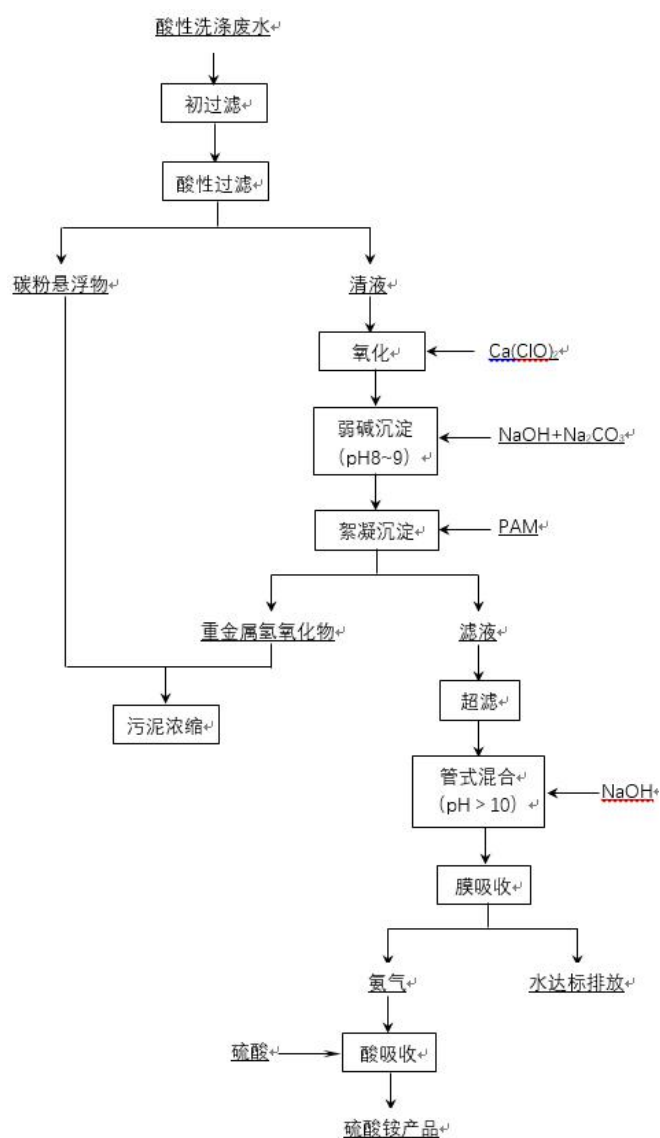


图 1 烟气净化废水处理系统工艺流程图

### 3.2 主要创新点

(1) 基于活性炭与胶体电性相吸和活性炭的微孔吸附机制，金属离子与活性炭粉共沉淀的机理，发明了利用活性炭源头吸附废水中的胶体，并通过金属基助凝剂高效絮凝脱水去除

胶体的工艺。

(2) 通过物相特性研究, 揭示了 COD 对膜丝的损伤机制和氟化物在膜丝表面结垢的特征。发现次氯酸钙能深度氧化降解 COD 并同步除氟的双效功能, 开发了基于氟离子调控的非均相催化次氯酸钙氧化协同深度脱除 COD、除氟技术。

(3) 研究了金属离子在碱性条件下的去除规律, 基于金属螯合的去除机理, 合成巯基改性硅基吸附材料, 实现 pH8~9 条件下金属离子的高效去除, 解决了强碱条件下去除金属造成氨逃逸和金属氨络合的难点。

(4) 研究了膜丝孔径对透气过滤影响的规律、高氨脱除放热变化规律及膜丝性能衰减规律, 发明了恒张力卷绕纺丝—连续拉伸成孔—长寿命改性—膜丝编织的制备新方法, 得到高效散热—大孔径分布率高的膜材料, 研制了强化传质的高抗污染膜组件。

#### 4. 污染治理或环境修复效果

胶体去除率 > 99%, 活性炭粉絮体面积提高 64~672 倍; COD、F<sup>-</sup>协同脱除, COD < 60mg/L、F<sup>-</sup> < 10 mg/L; pH 8~9 条件下, 金属离子去除率 > 99%; 氨氮去除率 > 99%, 硫酸铵回收率 > 99%。处理后的废水用于钢厂钢渣冲洗, 不外排, 产生的废气经收集净化后达标排放。

#### 5. 技术示范情况

该技术已应用于农药、危废、垃圾渗滤液处理及电厂、印染、钢铁等多个行业, 推广应用 22 项高浓度氨氮废水治理工程。

宝钢湛江钢铁有限公司炼铁厂烧结制酸废水增设膜处理设施项目，处理规模 192m<sup>3</sup>/d，采用该技术处理后的废水悬浮物、金属离子（总铁、总锌、总铜、总砷、六价铬、总铬、总铅、总镍、总镉、总汞）浓度满足国家《钢铁工业水污染物排放标准》（GB13456-2012）要求，悬浮物平均去除率 98.5%，COD 平均去除率 97%，出水氨氮浓度 < 15mg/L，达到废水外送冲洗钢渣要求。含硫炭粉、金属离子沉淀污泥、氟化钙可返回烧结进行焚烧，废水中的氨氮可转化为硫酸铵，整个系统无副产物产生。

## 6. 投资估算

宝钢湛江钢铁有限责任公司炼铁厂烧结制酸废水增设膜处理设施工程投资建设约 1600 万元。

## 7. 投资回收期

宝钢湛江钢铁有限责任公司炼铁厂烧结制酸废水增设膜处理设施静态投资回收期约 1 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

该技术可用于钢铁厂烧结活性炭烟气脱硫制酸废水处理，也可用于冶金、电力、石化、水泥等行业产生的脱硫废水和工业废水处理，具有广阔的市场前景和良好的环境效益。

# （十七）基于污染源源解析及点面源治理的小流域综合整治集成技术

## 1. 技术名称

基于污染源源解析及点面源治理的小流域综合整治集成技术

2. 适用范围

城市内河治理。

3. 技术内容

3.1 技术原理

该技术针对城市小流域污染现状，以河道断面考核为目标，基于高效精准的小流域污染源解析技术，形成了基于大数据流域特征分析的流域治理顶层设计，开发了流域水质预警软件，形成了基于河道旁侧处理、合流制溢流处理、污水处理厂高标准排放及流域水质预警的城市小流域综合治理集成技术。

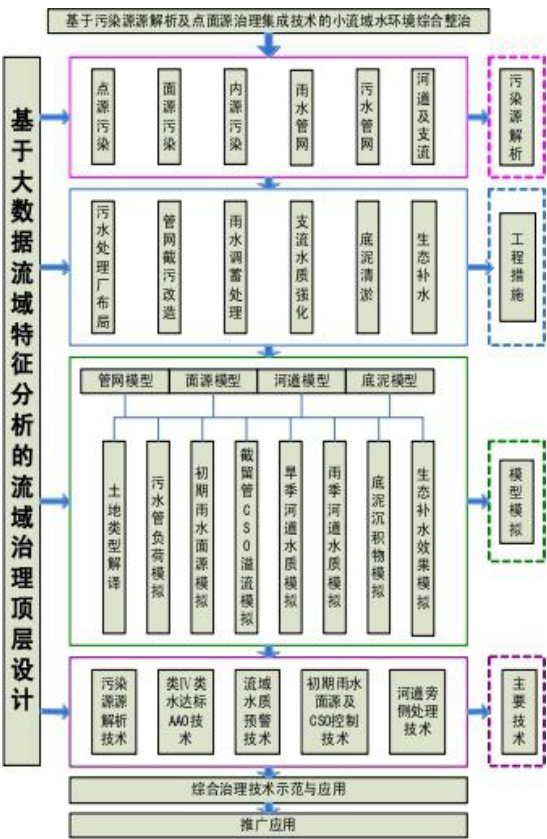


图 1 小流域综合整治集成技术路线图

### 3.2 主要创新点

(1) 提出了流域治理 “资源化优先，治水空间格局优化，系统治理，分步实施” 的理念，制定了以小流域为单元水环境综合治理的解决方案，污水处理厂出水成为河流的生态补给水，实现了河流的生态价值，同时使下游管网恢复非承压状态，避免了下游管网经常破损难以修复的困境。

(2) 提出 “混凝+生物强化+水下森林” 的河道旁侧处理技术集成及 “调蓄+高效混凝+接触氧化+湿地” 的初期雨水调蓄治理集成技术，降低面源入流污染负荷，强化河道水体水质净化，实现了流域治理经济效益与环境效益的优化配置。

(3) 针对流域治理运营中存在的调度难、考核难、管理难 的现状，提出流域运营考核、协调、管理等优化建议，形成流域治理长效运营机制，实现了流域治理的长效及持续性改善。

### 4. 污染治理或环境修复效果

以合肥市十五里河流域治理工程为例，国控考核断面主要 污染物氨氮月均值降低了 86.5%，国控考核断面水质由 GB 3838-2002 劣 V 类提升为准Ⅲ类。

### 5. 技术示范情况

该集成技术已在巢湖流域、淮河流域、黄河流域、珠江流 域等重点流域 6 个流域治理项目中推广应用。

合肥市十五里河流域综合治理工程项目，河流长度 22.9km， 所辖流域面积 111km<sup>2</sup>。通过污染源源解析掌握流域污染特征，

利用地理信息系统、管网模型、河道模型等软件集成建立全流域点面源模型，掌握污染源与河道水质断面的关系，指导十五里河流域治理工程综合布局，形成以污水处理厂、面源治理、河道旁侧处理、污水调配及生态补水为核心的流域治理工程集成示范。该集成技术应用后，国控断面水质由 GB 3838-2002 劣 V 类提升至准Ⅲ类，水环境质量显著改善。

## 6. 投资估算

合肥市十五里河流域治理示范项目工程投资 220183.40 万元，单位流域面积投资 0.198 亿元/km<sup>2</sup>。

## 7. 投资回收期

十五里河流域治理项目投资回收期 4.58 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

“十四五”期间，长江流域、黄河流域等河湖水生态环境面临更高的环境管理要求。该集成技术示范工程项目运行效果良好，可实现城市小流域河道控制断面水质达到 GB 3838-2002Ⅲ~Ⅳ类标准，在小流域综合整治及黑臭水体治理领域具有广阔的应用前景。

### （十八）雨污合流及地表径流水污染处理系统

#### 1. 技术名称

雨污合流及地表径流水污染处理系统

#### 2. 适用范围

雨污合流及地表径流水污染处理。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

##### (1) 雨水调蓄系统

雨水调蓄系统关键设备包括旋转格栅除污机、智能射流搅拌冲洗器、雨污终端分流自控装置等。该系统通过对旱流污水、初期雨水及中后期雨水的分类处理，有效避免了初期雨水中污染物通过雨水管道直接排放，同时中后期雨水须经过调蓄系统的在线处理工艺后方可排放，使城市排水系统中的径流污染得到有效控制。采用模块化设计，因地制宜，可根据工程需要增减设备。

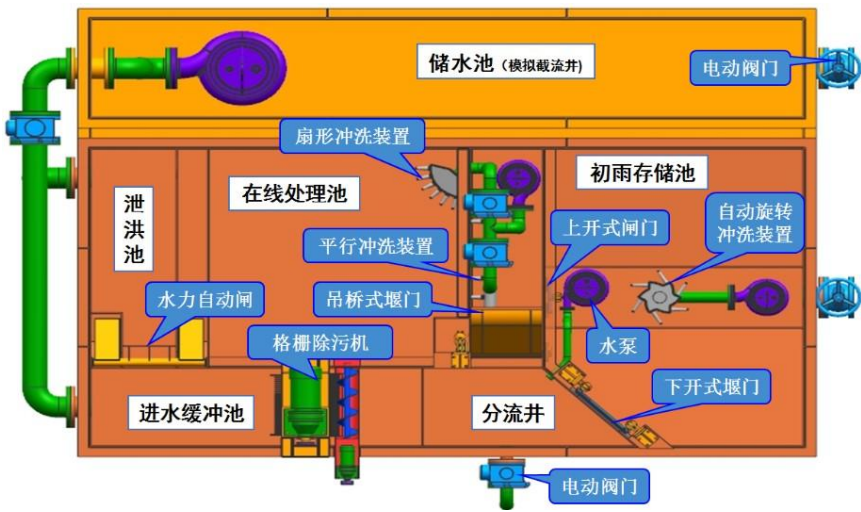


图 1 雨水调蓄系统工艺流程示意图

##### (2) 市政排水管道封堵装置

开发了多自由度堵头，可在小范围内自动搜索并定位水下盲区管道口；堵头工作面为球面或锥面，使堵头与水下管道口

呈线性接触，增加了堵头与管道口的接触压强，实现良好的密封效果；承托导向装置利用杠杆原理可将堵头施加给活塞杆缸头的力矩转移到支撑架上。该技术可形成系列化、标准化的产品，替代原来的检修类闸门。

### （3）水质自动在线监测装备和水环境在线监控系统

运用现代传感器技术、嵌入式技术及实时在线监测技术，开发了智能化的综合集成多种水质参数的在线监测设备；开发了一套智能在线自动监控系统，利用低功耗、高性能的嵌入式控制器将采集到的水质参数通过网络将数据传输到远端的监测控制中心，达到水质模型参数实时监控的效果。该系统可实现自动连续在线监测、预警，监测装备浮力达 100kg 以上，监测水深不超过 50m。

## 3.2 主要创新点

（1）雨水调蓄系统采用模块化设计，因地制宜，可根据工程需要增减设备。整个雨水调蓄系统为机电一体化系统，可通过超声波液位仪反馈的液位信号远程控制各个关键设备不同时间节点的启闭，并通过水环境在线监控系统对调蓄池中的水质情况进行实时监控和管理，真正实现智能化控制。

（2）市政排水管道封堵装置突破了常规水下管道的封堵模式，使操作人员在岸上即可完成对水下盲区管道口的封堵，确保了混排污水及雨水径流、市政给排水、污水处理厂等在不停产、不排空的前提下能快速安全地带水安装、检修设备等。

(3)水质自动在线监测装备以浮标为载体,集成遥测终端、水质监测传感器、太阳能供电系统和锚泊系统等实现连续在线监测,可预警并触发响应流程。

#### 4. 污染治理或环境修复效果

雨水调蓄技术及装备有效避免了初期雨水直接排放,同时中后期雨水经过调蓄系统在线处理后排放,有效控制了城市排水系统中的径流污染。排水管道封堵装置可针对水下盲区任意尺寸的管道口实施水下盲区封堵,封堵时泄漏量不大于  $1.25\text{L}/(\text{min}\cdot\text{m})$ ,而且操作简便、可靠。智能化在线监测装备及系统全年数据有效接收率  $\geq 95\%$ 。

#### 5. 技术示范情况

整体技术在马鞍山中心城区水环境综合治理 PPP 项目、深圳市布吉河水环境综合整治工程、滁州市清流河水质改善应急工程、滁州市污水处理厂和来安县污水处理厂等项目中应用,且每个项目多次应用。

雨水调蓄系统关键技术应用于马鞍山市中心城区水环境综合治理 PPP 项目等,通过对旱流污水、初期雨水及中后期雨水的分类处理,有效避免了初期雨水直接通过雨水管道排放,同时中后期雨水经过调蓄系统在线处理工艺排放,有效控制了城市排水系统中的径流污染。

滁州市污水处理厂应用了水下液压式锥面管道封堵装置,规格为 SMFZ-16-1600-380,对水下 5m 深处直径 1600mm 的进

水口实施了有效封堵，实现了内部短暂停水，为后序分配闸、潜污泵的维修及清理池内垃圾等赢得了宝贵时间，大大减轻了维修人员的劳动强度，同时也产生一定的经济、社会效益。以污水处理量 10 万  $\text{m}^3/\text{d}$  的污水处理厂为例，若该厂使用水下管道封堵装置进行应急管道封堵，按每次进水管口应急停水两天进行计算，每次使用该封堵装置可减少 20 万 t 污水直接流入自然水域，有效避免了环境污染。若按污水处理费 1.5 元/ $\text{m}^3$  计算，每使用一次，污水处理厂可减少直接经济损失 30 万元。该封堵装置在使用期间无使用成本，并可重复使用若干年。

水质自动在线监测装备、水环境在线监控系统与评价预警系统在马鞍山市中心城区水环境综合治理 PPP 项目等水环境治理项目中成功应用，实现了对水质、水文参数的实时在线监测，可实现无人值守、水质数据的在线监控，及时对水环境生态进行评估，系统操作便捷。

## 6. 投资估算

装置研制费用合计 470 万元，其中雨水调蓄系统 301 万元，市政排水管道封堵装置 41 万元，水质自动在线监测装备 128 万元。

## 7. 投资回收期

根据研制装备工程应用产生的年收益，静态投资回收期 0.6 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

该技术可支撑流域水环境管理和决策，有效防范水环境风险，已在多个工程项目中应用，具有良好的市场应用前景。

## 二、大气污染治理领域

### （十九）钢铁行业链篦机一回转窑球团烟气超低排放技术

#### 1. 技术名称

钢铁行业链篦机一回转窑球团烟气超低排放技术

#### 2. 适用范围

链篦机一回转窑球团烟气治理。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

该技术利用主流的选择性非催化还原（SNCR）及选择性催化还原（SCR）脱硝技术，结合链篦机一回转窑的生产烟气温度特点，将脱硝技术嵌入到链篦机一回转窑生产工艺过程中。从整个流程方面，结合生产工艺的烟气温度变化，设置了三级脱硝系统。一级采用 SNCR（850℃~1150℃）脱硝，二级采用高温高尘（320℃~420℃）SCR 脱硝，三级采用低温（100℃~180℃）氧化辅助半干法协同脱硝。

脱硫采用半干法脱硫+布袋除尘器，在球团烟气高 SO<sub>2</sub> 浓度、低排烟温度下，对循环流化床（CFB）的床层压降、循环灰量、塔内固气比与脱硫效率之间的关系进行了优化设计，确定最优工艺参数，建立运行导则。通过化学动力学、流场传质分析，优化了 CFB 吸收塔设计。同时在低温滤料的筛选、防糊袋措施，以及布袋的保温、防腐等方面，也进行了优化设计。

##### 3.2 主要创新点

(1) 将脱硝技术嵌入到链篦机一回转窑生产工艺流程过程中。无需对烟气进行升温，无需消耗补燃加热能源，运行成本低；不存在 GGH 换热器腐蚀及堵塞的问题，整个系统比较简单，设备少，易于操作及维护。

(2) 设置了三级脱硝，实现了脱硝温度自动可调， $\text{NO}_x$  达到超低排放。满足启、停机及负荷变化过程的达标排放，实现与主机 100 % 同步作业。解决了仅设置一级脱硝难以实现超低排放、负荷及温度变化时易超标的问题。

(3) 脱硫系统能够实现烟气中二氧化硫与氮氧化物的同时脱除，且能够达到球团烟气高  $\text{SO}_2$  浓度、低排烟温度下的超低排放要求。

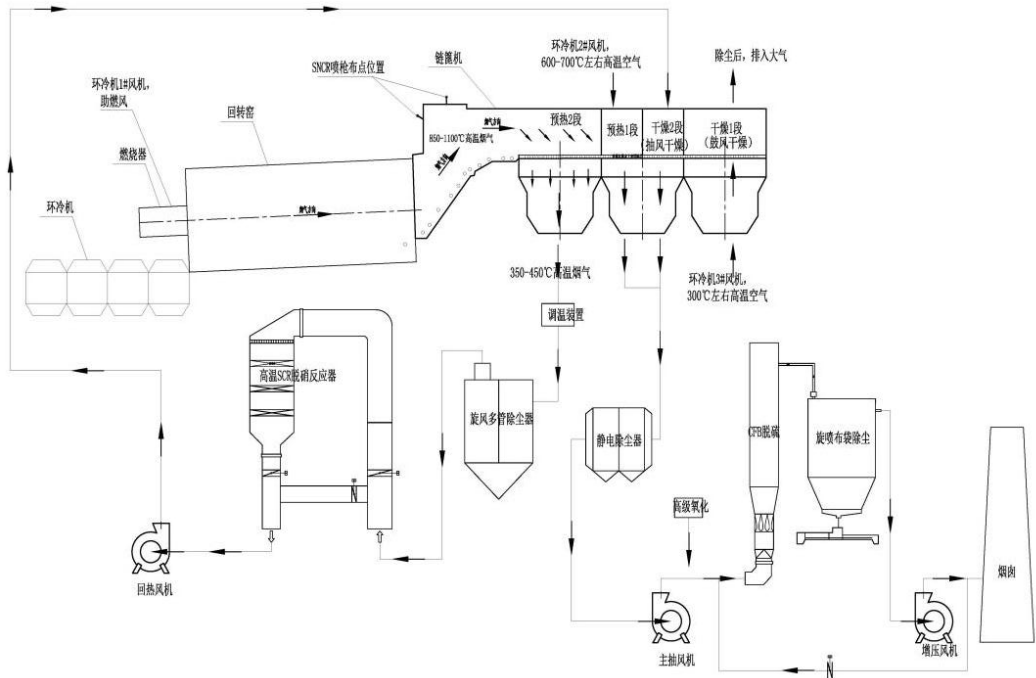


图 1 链篦机—回转窑氧化球团烟气超低排放技术工艺路线

#### 4. 污染治理或环境修复效果

以迁安市九江线材有限责任公司超低排放项目为例，净化后烟气  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、颗粒物排放浓度分别  $\leq 20\text{mg/m}^3$ 、 $\leq 30\text{mg/m}^3$  和  $\leq 5\text{mg/m}^3$ 。

#### 5. 技术示范情况

该项目已应用于迁安市九江线材有限责任公司 1<sup>#</sup> 和 2<sup>#</sup> 各 240 万 t/a 链篦机一回转窑烟气脱硫脱硝除尘超低排放 EPC 总承包项目，每套系统处理规模 120 万  $\text{m}^3/\text{h}$ ，技术路线为 SNCR 脱硝+SCR 脱硝+CFB 脱硫。该系统可连续、稳定满足超低排放要求，各项技术、经济指标均达到甚至优于设计指标。

#### 6. 投资估算

以单台年产球团矿量 240 万 t 链篦机一回转窑球团(处理烟气量 120 万  $\text{m}^3/\text{h}$ ) 为例，工程总投资 6800 万元。

#### 7. 技术成果转化推广前景

随着国内大型钢铁企业大力发展高比例球团高炉冶炼技术，球团烟气污染物排放量也将大幅提高，烟气超低排放的需求也相应增加，该技术未来的应用前景广阔。

### (二十) 双级错流活性炭法烟气净化系统及装备

#### 1. 技术名称

双级错流活性炭法烟气净化系统及装备

#### 2. 适用范围

钢铁、焦化等行业烟气多污染物治理。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

双级错流活性炭法烟气净化系统采用双级活性炭吸附塔串联工艺，吸附塔内活性炭自上而下流动，烟气从垂直活性炭的方向错流穿过活性炭床层以实现烟气的净化。一级吸附塔用于脱除  $\text{SO}_2$ 、初步脱除二噁英、初步除尘等，二级吸附塔主要用于脱除  $\text{NO}_x$ 、深度脱除二噁英、深度除尘等。采用多级喷氨、分层可控错流高效吸附技术与装备、烟温控制技术实现多污染物协同高效脱除和副产物的资源化利用。吸附塔设计活性炭床层厚度 1.6m ~ 2.0m，设计空塔流速 0.10 m/s ~ 0.15m/s，活性炭再生温度 400°C ~ 450°C。采用双级活性炭串联技术，脱硝效率提高约 30%，达 90%以上，运行费用较传统烟气净化工艺低 30%。工艺流程见图 1。

#### 3.2 主要创新点

开发了分段多级喷氨与串联双级相结合的吸附技术与装备、分层可控错流高效吸附技术与装备、烟温控制及废水零排放技术、氨气—空气混合装置，形成了具有自主知识产权的新一代活性炭法烟气净化技术及成套装备，开发了具有多污染物协同去除效率高、能源介质利用率高、运行安全稳定、副产物可资源化利用的活性炭法烟气净化技术体系，实现了超大烟气量、重污染的烧结烟气净化及超低排放。

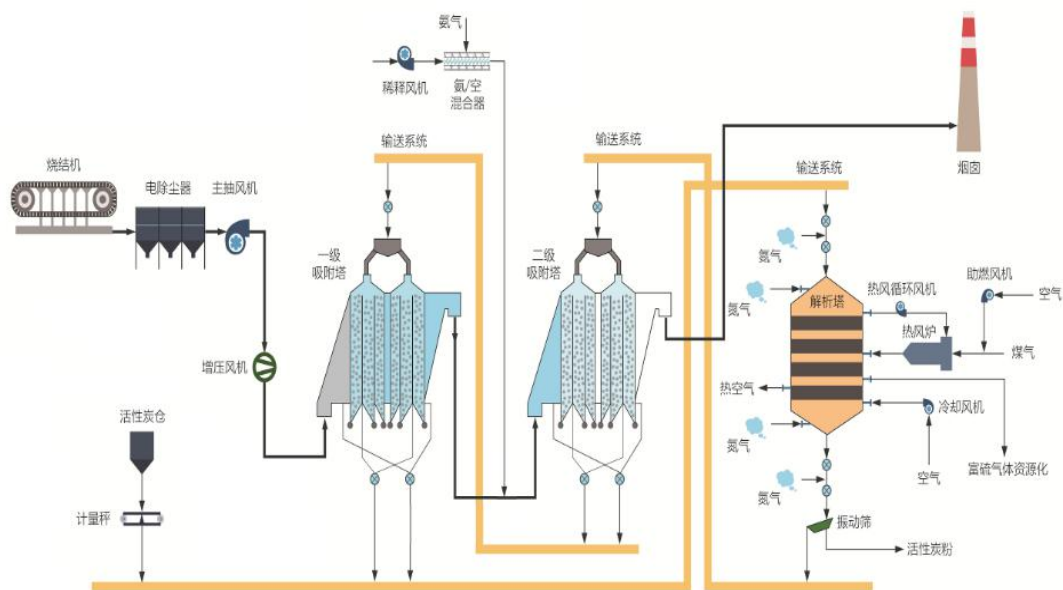


图 1 双级错流活性炭法烟气净化工艺流程图

#### 4. 污染治理或环境修复效果

出口烟气中颗粒物浓度  $\leq 10\text{mg/m}^3$ ， $\text{SO}_2$  浓度  $\leq 35\text{mg/m}^3$ ，氮氧化物浓度  $\leq 50\text{mg/m}^3$ ，二噁英浓度  $\leq 0.1\text{ngTEQ/m}^3$ 。

#### 5. 技术示范情况

该技术已在宝武钢铁、安阳钢铁等钢厂的 25 台（套）烟气净化系统中应用。晋南钢铁集团有限公司  $2 \times 220\text{m}^2$  烧结烟气活性炭脱硫脱硝工程，采用两套双级错流式活性炭烟气净化装置，烟气进口  $\text{SO}_2$  浓度  $\leq 2000\text{mg/m}^3$ 、颗粒物浓度  $\leq 50\text{mg/m}^3$ 、 $\text{NO}_x$  浓度  $\leq 350\text{mg/m}^3$ 、二噁英类浓度  $\leq 2.5\text{ngTEQ/m}^3$  时，出口颗粒物浓度  $\leq 8\text{mg/m}^3$ 、 $\text{SO}_2$  浓度  $\leq 5\text{mg/m}^3$ 、 $\text{NO}_x$  浓度  $26\text{mg/m}^3 \sim$

32mg/m<sup>3</sup>、二噁英类浓度 ≤ 0.1ngTEQ/m<sup>3</sup>，实现了烧结烟气污染物的超低排放。副产物浓硫酸品质达到特级标准，每天产量约 100t。制酸废水经处理后在钢铁厂内部循环利用，废水不外排。

## 6. 投资估算

以晋南钢铁集团有限公司 2×220m<sup>2</sup> 烧结烟气活性炭脱硫脱硝工程项目为例，工程总投资 38351.22 万元，其中建筑安装费 12195.63 万元，设备费 25051.87 万元，其他费用 1103.72 万元。

## 7. 技术成果转化推广前景

我国现有烧结机或球团设备的钢铁企业 683 家，共拥有烧结机 1100 余台，烧结机面积约 15 万 m<sup>2</sup>。生态环境部等五部委联合发布的《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》指出，到 2025 年底前，全国力争 80% 以上产能完成改造。因此近 3 年活性炭法烧结烟气多污染物治理技术市场需求激增，该技术符合国家产业政策，市场前景广阔。

### （二十一）臭氧氧化协同液相吸收脱硫脱硝关键技术与装备

#### 1. 技术名称

臭氧氧化协同液相吸收脱硫脱硝关键技术与装备

#### 2. 适用范围

钢铁烧结、焦化等行业低温烟气脱硫脱硝。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

气相臭氧（O<sub>3</sub>）氧化协同液相吸收脱硫脱硝技术涉及气相

氧化、液相吸收和还原三个过程：先将臭氧投加到烟道混合器中，使烟气与臭氧充分混合并发生氧化反应；烟气进入吸收塔，在液相吸收塔内实现  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  及其他污染物的同步高效吸收， $\text{O}_3/\text{NO}$  摩尔比 1.5 ~ 2.0，脱硝产物进入烧结工艺还原处理。

由于  $\text{N}_2\text{O}_5$  和  $\text{SO}_2$  在气相和水中溶解的扩散能力与溶解于水溶液的能力相当，因此可在同一吸收塔内实现同步高效脱硫脱硝。 $\text{SO}_2$ 、重金属类污染物也被  $\text{O}_3$  氧化，降解为低毒害或易于吸收脱除的物质。

工艺流程如图 1 所示， $\text{O}_3$  通过投加混合器投加到吸收塔前的烟道中，并与烟气充分混合，使  $\text{NO}$  深度氧化为  $\text{NO}_3$  和  $\text{N}_2\text{O}_5$ 。然后烟气进入吸收塔，与吸收液作用实现同步脱硫脱硝。净化后的烟气经除尘后外排，使二氧化硫和氮氧化物均满足超低排放的控制要求。废水进行无害化处理，硝酸盐组分在高炉中还原为  $\text{N}_2$ 。

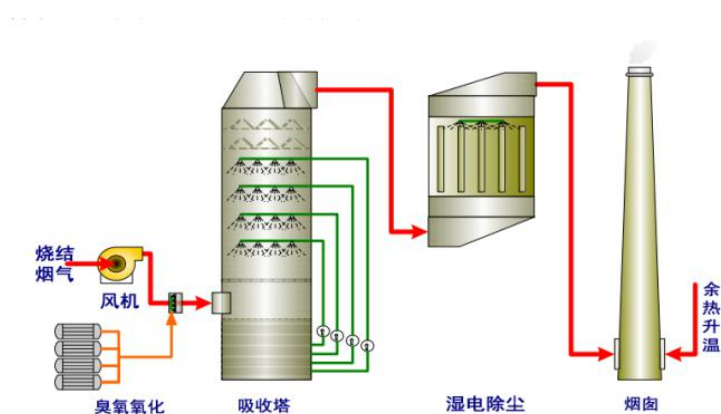


图 1 臭氧氧化协同液相吸收脱硫脱硝工艺流程

### 3.2 主要创新点

(1) 该技术将 NO 深度氧化为  $\text{NO}_3$  和  $\text{N}_2\text{O}_5$ ，从而显著提高脱硝效率，成功解决了传统臭氧氧化协同吸收技术不能实现超低排放和冒黄烟的问题。

(2)  $\text{O}_3$  投加仅涉及小气量气流分布装置及喷嘴，脱硫脱硝可在同一反应器实现，因而设备数量和体积小且结构简单，投资和运行费用低，操作运行简单。

(3) 仅涉及气体和液体两种流体循环输送，烟道采用碳钢内衬玻璃鳞片防腐，浆液循环管道采用碳钢衬胶防腐，臭氧管道采用不锈钢管，湿烟囱采用玻化砖涂烟囱胶防腐，设备使用率高。

(4) 仅涉及  $\text{SO}_2$  和  $\text{N}_2\text{O}_5$  向易于实现断面均匀布置的碱性吸收液传递，不涉及这些污染物向不易实现断面均匀布置的粉状或颗粒状物料表面传递，而且臭氧发生、输送和投加过程安全方便，因而过程更加稳定、可靠。

(5) 烟气中的  $\text{SO}_2$  最终转化为石膏等副产物，NO 转化为可掺入烧结料，使硝酸盐中的 N 组分还原为  $\text{N}_2$ ，不会产生固、液、气方面的二次污染。

### 4. 污染治理或环境修复效果

脱硝效率 85%~96%，脱硫效率 90%~98%，出口  $\text{NO}_x$  浓度  $\leq 50\text{mg/m}^3$ 、 $\text{SO}_2$  浓度  $\leq 35\text{mg/m}^3$ 、 $\text{O}_3$  浓度  $\leq 0.07\text{mg/m}^3$ 。

### 5. 技术示范情况

该技术已在燕山钢铁有限公司 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>300m<sup>2</sup> 烧结机臭氧

脱硝改造项目和燕山钢铁有限公司铁热轧一厂 950 加热炉、热轧二厂 1780 加热炉、热轧三厂 1580 加热炉的烟气脱硫脱硝项目中应用,烟气出口  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  等浓度可满足相关排放标准要求。

以燕山钢铁 3#300m<sup>2</sup> 烧结机臭氧脱硝超低排放改造项目为例,处理规模 198 万 m<sup>3</sup>/h, 平均脱硫效率 96.9%, 平均脱硝效率 87.2%。烟气出口  $\text{NO}_x$  浓度  $\leq 50\text{mg/m}^3$ ,  $\text{SO}_2$  浓度  $\leq 35\text{mg/m}^3$ , 颗粒物浓度  $\leq 10\text{mg/m}^3$ 。二噁英出口浓度  $\leq 0.061\text{mg/m}^3$ ,  $\text{O}_3$  出口浓度  $\leq 0.07\text{mg/m}^3$ 。

## 6. 投资估算

以 300m<sup>2</sup> 烧结机 (烟气量 1980000m<sup>3</sup>/h) 单一脱硝改造投资费用为例,投资 5850 万元,脱硫—脱硝—除尘合计改造投资约 8000 万元。

## 7. 技术成果转化推广前景

该技术已在钢铁烧结行业成功应用,未来可进一步推广应用于水泥、玻璃、陶瓷、非电燃煤锅炉等其他非电力行业的烟气治理,具有广阔的市场应用前景。

### (二十二) 烧结机头烟气低温选择性催化还原法脱硝技术

#### 1. 技术名称

烧结机头烟气低温选择性催化还原法脱硝技术

#### 2. 适用范围

钢铁烧结烟气治理。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

该技术通过元素表面修饰和体相掺杂技术调整催化剂的表

面酸碱性和氧化还原能力，改进催化剂配方，并进一步完善了催化剂的成型工艺，开发了低温催化剂保护、热风直接蒸氨技术和装置。同时运用数值模拟技术进行流场模拟，开发了喷氨—脱硝—热解一体化结构形式，解决了低温含硫条件下 SCR 高效脱硝的难题，同时显著降低燃料消耗。运用数值模拟进行流场分析，保证烟气温度场偏差 $<10^{\circ}\text{C}$ ，速度场偏差 $<15\%$ ， $\text{NH}_3/\text{NO}_x$  摩尔比绝对偏差 $<5\%$ 。

工艺流程如下：经脱硫后的烟气被脱硝系统新增引风机抽取，经 GGH 后被换热至  $150^{\circ}\text{C}$  以上，被换热后的烟气再与热风炉系统出口  $800^{\circ}\text{C} \sim 1000^{\circ}\text{C}$  左右的高温烟气混合成  $180^{\circ}\text{C}$  的混合烟气，混合烟气经过脱硝反应器完成脱硝反应。 $180^{\circ}\text{C}$  的高温烟气再经过 GGH 与脱硫系统后烟气换热至  $105^{\circ}\text{C}$  左右经脱硝系统引风机排至大气。催化剂采用 2+1 布置形式，初装 2 层，预留 1 层。

烧结机头烟气脱硝系统工艺流程见图 1。

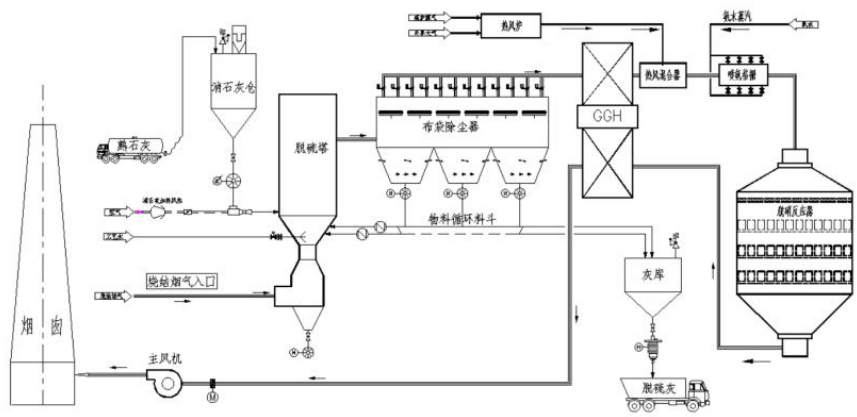


图 1 瑞丰钢铁 3#烧结机烟气脱硝系统工艺流程图

### 3.2 主要创新点

研发了不高于 180°C 的烟气温度下，脱硝效率大于 90% 的优良低温 SCR 催化剂。运用数值模拟技术进行流场模拟，开发了喷氨—脱硝—热解一体化结构形式，同时开发了低温催化剂保护、热风直接蒸氨技术和装置。通过以上的技术创新，实现 NO<sub>x</sub> 的高效去除，同时减少煤气消耗，降低运行费用。

### 4. 污染治理或环境修复效果

以唐山瑞丰钢铁 3# 烧结机 (200m<sup>2</sup>) 烟气脱硝项目为例，设计工况下，NO<sub>x</sub> 排放浓度 < 20mg/m<sup>3</sup>，氨逃逸 < 1mg/m<sup>3</sup>，二噁英浓度 < 0.011ngTEQ/m<sup>3</sup>。

### 5. 技术示范情况

唐山瑞丰钢铁 3# 烧结机 (200m<sup>2</sup>) 烟气脱硝项目，脱硝系统入口烟气量 108 万 m<sup>3</sup>/h，烟气温度 75°C ~ 100°C，入口 NO<sub>x</sub> 浓度 ≤ 450mg/m<sup>3</sup>，SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub> 转化率小于 1%，脱硝系统总阻力 ≤ 4000Pa。系统运行稳定。与中温 (240°C ~ 280°C) SCR 脱硝相比，煤气节省 30%，工况烟气量减少 15% ~ 20%，低温脱硝系统运行电耗降低 4% ~ 5%。

### 6. 投资估算

以唐山瑞丰钢铁 3# 烧结 (200m<sup>2</sup> 烧结机) 脱硝项目为例，合同额 3340 万元，其中催化剂投资 1080 万元。

### 7. 投资回收期

以唐山瑞丰钢铁 3# 烧结 (200m<sup>2</sup> 烧结机) 脱硝项目为例，

投资回收期 1.67 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

根据国家要求，到 2025 年底前，重点区域钢铁企业超低排放改造基本完成，全国力争 80% 以上产能完成改造。我国现有烧结机约 900 台，预计烧结烟气脱硝的市场空间超过 200 亿元，该技术具有广阔的市场前景。

### （二十三）水泥窑烟气中低温选择性催化还原法脱硝技术

#### 1. 技术名称

水泥窑烟气中低温选择性催化还原法脱硝技术

#### 2. 适用范围

建材行业窑炉烟气脱硝。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

该技术基于国际上已运行电力和其他工业窑炉的应用经验，综合了水泥生产工艺技术特点及相关国家标准，提出在水泥窑尾余热锅炉出口布置 SCR 反应器的技术路线，既可以满足催化剂运行需求，又不影响余热发电效率和水泥企业生产能耗；基于传统钒基催化剂体系稳定性高的优势，通过稀土耦合、载体改性和活性物种调控技术调整催化剂表面酸碱性和氧化还原性，提高其在 180℃~250℃ 范围内的脱硝活性和抗中毒性；开发蜂窝状中低温催化剂成型技术，并通过技术集成实现规模化生产。催化剂适用烟气温度 180℃~250℃，耐受碱性粉尘浓度

$10\text{g}/\text{m}^3 \sim 80\text{g}/\text{m}^3$  ( $\text{O}_2$  含量 10%),  $\text{NO}_x$  处理能力  $2200\text{mg}/\text{m}^2$ 。技术路线如图 1 所示。

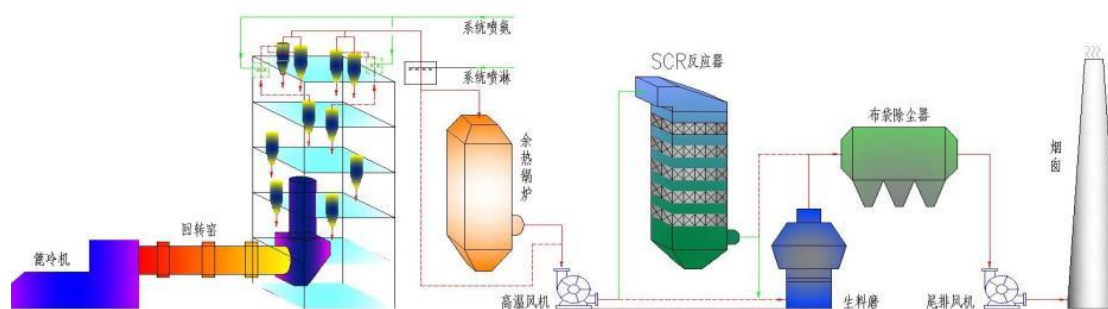


图 1 水泥窑炉中低温复杂烟气 SCR 脱硝技术路线图

### 3.2 主要创新点

(1) 研究探明了催化剂组成、结构及性能的相互关系，优化设计了催化剂的化学组成和物理结构，成功研发了稀土耦合钒钛体系的中低温 SCR 脱硝催化剂系列产品，实现了烟气在  $180^\circ\text{C} \sim 250^\circ\text{C}$  窗口温度下脱硝效率大于 90%。

(2) 在催化剂体系中引入非金属矿物，调节催化剂孔结构和表面状态，同时减少窑尾锅炉 (SP 锅炉) 回灰和硫酸氢氨在催化剂表面的沉积附着，提高催化剂耐磨性、抗粉尘堵塞和使用寿命。

(3) 开发了 SCR 脱硝催化剂干燥防腐一体化技术、智能焙烧升温控制技术、标准模块化装配的成套制备工艺技术，解决了中低温催化剂的高效制备难题，实现了工业化规模生产。

催化剂各项性能指标优于国家相关标准要求。

(4) 开发设计了中低温烟气 SCR 水泥窑炉脱硝工艺技术及装备，建成了国内外首台套水泥窑炉烟气中低温 SCR 脱硝反应器及其系统。

#### 4. 污染治理或环境修复效果

脱硝效率  $\geq 90\%$ ，催化剂化学寿命超过 24000h，机械寿命超过 30000h。

#### 5. 技术示范情况

该技术成果目前已在山西晋城合聚山水、河北鼎星水泥、石家庄中通建材、峨胜水泥等数十条新型干法水泥熟料生产线推广应用，其中有 8 个项目已建成，均能够将窑尾  $\text{NO}_x$  浓度控制在  $50\text{mg}/\text{m}^3$ （或  $35\text{mg}/\text{m}^3$ ）以下。

山西晋城合聚山水 5000t/d 生产线中低温 SCR 脱硝工程于 2022 年 5 月投运，一直稳定运行。该项目烟气温度  $180^\circ\text{C} \sim 220^\circ\text{C}$ ，自投运后窑尾烟囱  $\text{NO}_x$  排放浓度  $\leq 45\text{mg}/\text{m}^3$ ，氨逃逸  $\leq 5\text{mg}/\text{m}^3$ ；吨熟料氨水耗量  $< 1.8\text{kg}/\text{tcl}$ ，运行增加的吨熟料电耗  $< 2.5\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

#### 6. 投资估算

以一条 5000t/d 水泥生产线为例，将 SCR 反应器布置在窑尾余热锅炉后，催化剂用量约  $240\text{m}^3$ ，总投资约 2500 万元，其中设备和材料费约 1900 万元，建筑安装费 500 万元。

#### 7. 投资回收期

按国际上  $\text{NO}_x$  排污权交易核算，静态投资回收期 1 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

我国每年熟料产量约 15 亿吨，若该技术达到 10% 的推广率，每年可减少  $\text{NO}_x$  排放约 16 万 t；若实现 50% 的推广率，每年可减排  $\text{NO}_x$  约 80 万 t。同时，该技术在氨氮比  $\leq 1$  的条件下运行即可达到较高的脱硝率，可大量减少氨水等还原剂使用量，推广应用前景好。

### （二十四）工业烟气脱硫除尘深度净化及水回收技术

#### 1. 技术名称

工业烟气脱硫除尘深度净化及水回收技术

#### 2. 适用范围

缺水、常年温度较低地区的燃煤电厂锅炉、钢铁烧结机、水泥窑烟气治理。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

烟气通过旋汇耦合装置与浆液产生可控湍流空间，提高气液固三相传质速率，完成一级脱硫除尘，同时实现快速降温及流场均布；烟气继续经过高效喷淋系统，实现  $\text{SO}_2$  的深度脱除及粉尘的二次脱除；烟气进入管束式除尘除雾装置，在旋流分离器产生的高速离心力作用下，雾滴与粉尘在运动过程中相互碰撞，凝聚成较大的液滴，液滴被抛向筒体内壁表面，被壁面附着的液膜层捕获，实现粉尘和雾滴的深度脱除。在分离器之

间设置导流环，提升气流的离心运动速度，并维持合适的气流分布状态，以控制液膜厚度和气流的出口状态，防止液滴的二次夹带。达到超低排放的饱和净烟气进入冷却凝结段，经过旋汇耦合装置层与喷淋下来的冷却循环水进行强烈的气液接触混合实现降温，降温后的净烟气与喷淋层的液滴继续接触，大部分细小的液滴被捕捉与喷淋液一起落下，其余细小液滴在上部的除雾器层被捕捉，极少部分随冷凝洁净烟气排放。冷却循环水在冷却凝结塔内被加热，同时将吸收塔出口净烟气中残留的少量  $\text{SO}_2$ 、 $\text{SO}_3$ 、粉尘和石膏液滴等进一步脱除。回收的循环水和烟气冷凝液经加药调整 pH 值后，由水泵送至空气冷却器冷却至  $40^\circ\text{C}$ ，重新返回冷却凝结塔，回收的凝结水溢流进入回收水罐内用于脱硫系统或其他用水点。喷淋层喷嘴工作压力宜选取  $0.07\text{Mpa}$ ，喷嘴出口喷淋浆液滴粒径  $0 \sim 2000\mu\text{m}$ 。工艺流程如图 1 所示。

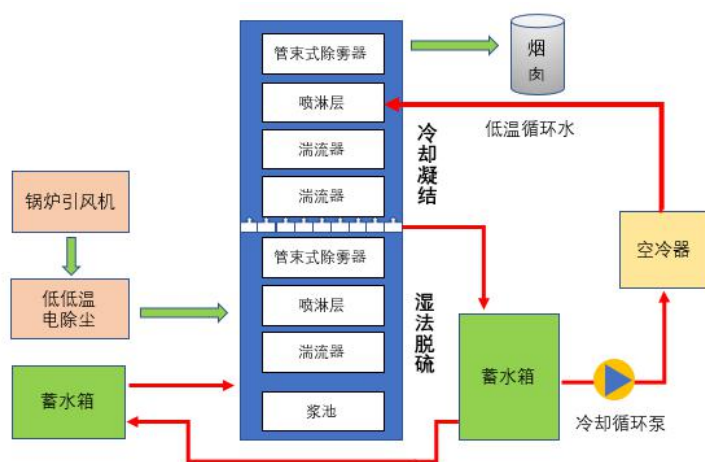


图 1 工艺流程图

### 3.2 主要创新点

(1) 研发应用了一体化烟气脱硫提水塔，实现脱硫塔和冷凝塔二塔合一，优化设计塔内升气盘，实现了气液分离和塔中收水。

(2) 研发了高效脱硫提水协同烟气超净处理技术，进一步降低  $\text{SO}_2$ 、烟尘等污染物浓度，设计工况下  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、烟尘等均低于燃气机组标准。实现了烟气脱硫提水协同处理  $\text{SO}_3$ ，消除了烟囱“蓝烟”效应。

### 4. 污染治理或环境修复效果

以京能（锡林郭勒）发电有限公司  $2\times 660\text{MW}$  燃煤汽轮发电机组项目为例，出口烟气中  $\text{SO}_2$  浓度  $\leq 10\text{mg}/\text{m}^3$ ，颗粒物浓度  $\leq 5\text{mg}/\text{m}^3$ ， $\text{SO}_3$  浓度  $\leq 0.08\text{mg}/\text{m}^3$ 。同步冷凝回收水量  $100\text{ t/h} \sim 120\text{ t/h}$ ，可满足厂区生产用水补水，电厂实现零补水运行。

### 5. 技术示范情况

京能（锡林郭勒）发电有限公司  $2\times 660\text{MW}$  燃煤汽轮发电机组是国内外首套应用该技术的机组。出口烟气中  $\text{SO}_2$ 、颗粒物、 $\text{SO}_3$  浓度均远低于《火力发电厂大气污染物排放标准》（GB13223-2011）中燃煤气轮机组的排放要求。烟气回收水供给电厂制水车间生产除盐水，满足发电生产使用，实现了火电厂发电零补水运行。

### 6. 投资估算

以 2×660MW 工业烟气脱硫除尘深度净化回收水项目为例，总投资 6056.31 万元。

#### 7. 投资回收期

以 2×660MW 工业烟气脱硫除尘深度净化回收水项目为例，静态投资回收期 6 年。

#### 8. 技术成果转化推广前景

该技术可用于电力、供热、石化等多个行业，尤其适用于环境脆弱、水资源匮乏地区的大气污染治理，具有良好的应用前景。

### （二十五）水泥炉窑富氧燃烧节能减排技术

#### 1. 技术名称

水泥炉窑富氧燃烧节能减排技术

#### 2. 适用范围

水泥生产，尤其适用于采用低热值燃料、替代燃料的工艺。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

利用吸附剂对特定气体的吸附、脱附能力，吸附空气中的氮气，释放出富氧空气，制氧浓度为 60%~95%。结合水泥炉窑煅烧工艺，通过窑头一次风、送煤风等路径供氧，实现水泥炉窑的富氧煅烧。从燃烧器送入煤粉，使燃料在富氧中充分燃烧，可提高煅烧火焰温度约 100℃，降低空气过剩系数、排烟量和粉尘量。富氧燃烧还可提高水泥熟料的质量、产量及降低能耗。

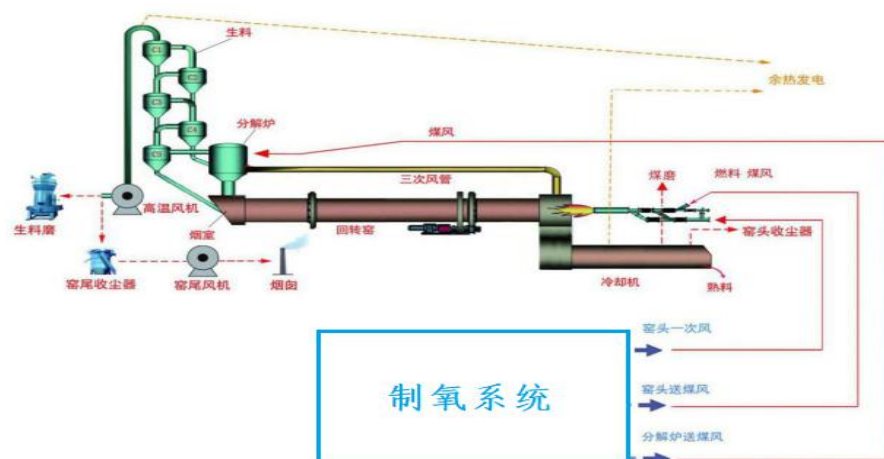


图 1 富氧燃烧技术工艺路线图

### 3.2 主要创新点

该技术提出并开发了变压吸附制氧技术与水泥炉窑煅烧有机结合的新工艺，可有效提升低质煤的使用比例，减少一次性能源的使用量，减少二氧化碳排放。

### 4. 污染治理或环境修复效果

该技术较传统技术节能 5% 以上，以白山水泥 4000t/d 水泥熟料生产线富氧燃烧节能减排项目为例，该技术可燃用 4800kcal/kg 低质煤（炉窑原煤值要求为 5500kcal/kg）；熟料的烧失量由 0.50% 降至 0.18%，减少煤碳消耗 5kg/t 熟料，减少 CO<sub>2</sub> 排放量 13kg/t 熟料。

### 5. 技术示范情况

以金刚（集团）白山水泥 4000t/d 水泥熟料生产线富氧燃烧

节能减排项目为例，采用变压吸附技术制备氧气，通过智能富氧控制系统确定富氧浓度，使用智能混氧器生成 30%~35% 富氧气体，能够提高煅烧火焰温度约 100℃，提高了燃料的燃烧效率，进一步稳定了水泥炉窑的热工制度。

## 6. 投资估算

以白山水泥富氧燃烧节能减排项目为例，项目设备总投资 970 万元。

## 7. 投资回收期

以白山水泥富氧燃烧节能减排项目为例，项目静态投资回收期 1.8 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

该技术为水泥炉窑、玻纤炉窑和玻璃炉窑等工业炉窑行业节能减排提供了可行的技术路线，应用前景良好。

（二十六）基于特种金属膜干法冶炼炉高温荒煤气净化及资源化技术

### 1. 技术名称

基于特种金属膜干法冶炼炉高温荒煤气净化及资源化技术

### 2. 适用范围

烟气入口颗粒物浓度  $\leq 150\text{g/m}^3$  工况条件下，黑色冶炼、有色冶炼、化工过程中矿热炉及类矿热炉的烟气净化和资源化。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

滤芯材料采用自主研发专利技术—铁基第五代膜过滤材料，该材料利用元素间的偏扩散引起的柯肯达尔（Kirkendall）效应和化学反应成孔，使材料兼具金属键和共价键混键结构，具有耐高温、耐腐蚀、高精度、抗热震性能好、可加工等特性，弥补了陶瓷膜在工况温度波动较大的环境中易开裂而无法应用于矿热炉高温过滤材料的难题。通过膜分离技术和设备创新，针对矿热炉高温烟气在水蒸气和焦油的露点以上高温过滤、分离和净化，将矿热炉高温烟气（含尘  $50\text{g/m}^3 \sim 150\text{g/m}^3$ ）在  $550^\circ\text{C}$  进行精密气固分离，得到洁净煤气（含尘小于  $10\text{mg/m}^3$ ），经换热器回收热能（同时得到纯净焦油副产品）后，送至用户处作为化工原料或燃气发电。

按 36000kVA 密闭炉设计，单台除尘装置处理风量  $8000\text{m}^3/\text{h} \sim 14000\text{m}^3/\text{h}$ ；除尘器工作温度  $\leq 550^\circ\text{C}$ ；高温过滤精度达  $0.1\mu\text{m}$ ；除尘器阻力  $< 2\text{kPa}$ 。

工艺流程如图 1 所示：从密闭矿热炉产生的高温荒煤气（主要含  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$  及粉尘等）经过重力除尘器去除大颗粒粉尘，然后进入金属间化合物膜过滤器过滤，气体含尘量满足客户要求，再进一步经过风冷换热器的冷却降温后通过高温引风机送至气柜储存。最后洁净的煤气由气柜输送至矿石烧结工序作为燃料或其他用户处，实现能源的节约利用。

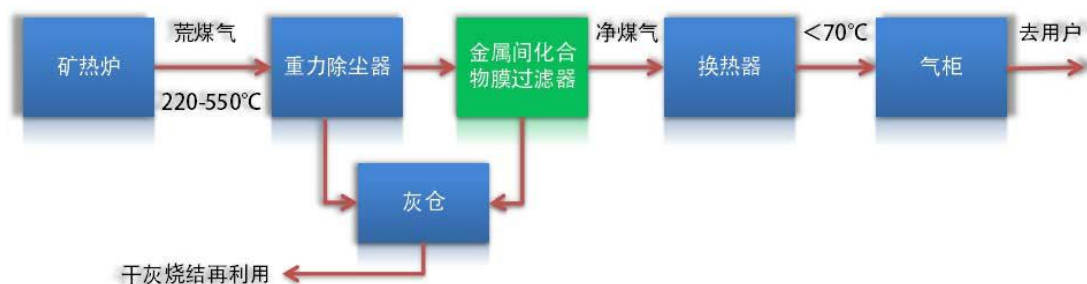


图 1 荒煤气高温除尘工艺流程

### 3.2 主要创新点

（1）率先采用元素之间偏扩散引起的 Kirkendall 效应制备金属间化合物多孔膜材料，解决了高温气体过滤领域的用材难题。基于原子尺度的偏扩散反应合成技术可在微米/亚微米级别实现孔结构的精确调控，使得该材料具有孔径分布均匀、高过滤精度、高孔隙度、曲折因子小和过滤阻力低等良好的过滤性能。

（2）针对矿热炉高温荒煤气烟气特点，构建了高温膜分离技术体系，形成了过滤介质防相变技术、过滤粉尘氧化防控技术，实现了高温下稳态与非稳态气体和粉尘的有效过滤；形成了高温反吹技术、防架桥技术、滤饼层控制技术、特殊工况的操控技术、膜元件在线再生和离线再生技术，有效控制膜污染。

## 4. 污染治理或环境修复效果

高温荒煤气经过滤后，颗粒物浓度 $\leq 10\text{mg/m}^3$ ，含 70%CO 气体全部回收利用。以青海际华江源铁合金密闭矿热炉项目为

例，实现年减排颗粒物近 1800t，全年回收冶炼煤气折算标煤约 19200t，年节约电能折算标煤约 2300t，年减排 CO<sub>2</sub>13000t。

## 5. 技术示范情况

该技术已累计应用于 50 套装备，典型案例为青海际华江源实业有限公司 50 万 t/a 铬铁合金密闭矿热炉高温煤气净化回收项目、攀钢集团钛业有限责任公司钛冶炼厂 2×25500kVA 高钛渣矿热炉煤气回收项目。

以青海项目为例，从两台 25500kVA 密闭矿热炉产生的高温荒煤气（主要含 H<sub>2</sub>O、H<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> 及粉尘等）经过重力除尘器除掉大颗粒粉尘，然后进入金属间化合物膜过滤器过滤，气体含尘量满足客户要求，再进一步经过风冷换热器的冷却降温后通过高温引风机送至气柜储存。最后洁净的煤气由气柜输送至矿石烧结工序作为燃料或其他用户处，实现能源的节约利用。该技术解决了 550℃ 以上高温气体过滤净化回收的技术难题，实现了铁合金行业节能环保生产和矿热炉烟气的回收综合利用。

## 6. 投资估算

青海际华江源实业有限公司 50 万 t/a 铬铁合金密闭矿热炉高温煤气净化回收项目总投资 2948 万元，其中设备制造费 2000 万元，土建（钢构）费 700 万元，设备安装费 248 万元。

## 7. 投资回收期

青海际华江源实业有限公司 50 万 t/a 铬铁合金密闭矿热炉高温煤气净化回收项目，静态回收期约 13 个月。

## 8. 技术成果转化推广前景

该技术可广泛用于矿热炉及类矿热炉、有色冶炼、煤化工、磷化工、钛化工、危废处置等行业的高温荒煤气净化，具有广阔的推广前景。

### （二十七）合成氨液氮洗尾气净化及资源化利用技术

#### 1. 技术名称

合成氨液氮洗尾气净化及资源化利用技术

#### 2. 适用范围

化工、冶金、航天气化炉等行业废气中含化学能低热值气体的净化及资源化。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

合成氨液氮洗尾气经催化氧化转化后获得的高温惰性气体可用于造气磨煤过程煤粉干燥气，为避免催化剂快速烧结和实现设备管道常规化（直接催化氧化温度可达  $900^{\circ}\text{C}$ ），需转移部分反应后热量及控氧氧化避免过度氧化。为精确调温和实现煤粉干燥指标要求，催化剂需具有低温高活性和在  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$  积炭动力学活跃区域具有强抗积碳能力。基于此，研制了液氮洗尾气分段催化氧化专用催化剂，开发了液氮洗尾气控氧催化氧化耦合反应后热的惰性气体用于煤粉干燥气资源化利用新工艺（如图 1 和图 2 所示），液氮洗尾气催化氧化后热的惰性气体可替代合成气补充氮气燃烧产生的热惰性气体，大量节约了合成气。

主要工艺参数：含化学能尾气热值  $500\text{kJ/m}^3 \sim 1800\text{kJ/m}^3$ ，反应温度  $400^\circ\text{C} \sim 650^\circ\text{C}$ ，催化剂耐短时热冲击温度  $750^\circ\text{C}$ ，装置低限运行温度大于  $250^\circ\text{C}$ 。

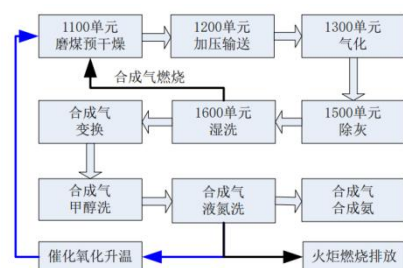


图 1 项目工艺简图

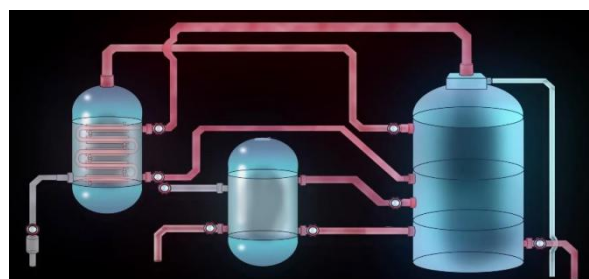


图 2 三段催化氧化工艺

### 3.2 主要创新点

(1) 研发了催化剂表面性质调控、毒性杂质组分选择固定位置构建、贵金属络合分散、原位炭化固定烧结稳定贵金属系列技术，突破了含化学能低热值气体催化氧化所需的贵金属催化剂制备技术瓶颈。

(2) 首创了液氮洗尾气分段催化氧化及资源化利用新工艺，开辟了将控氧催化氧化后热的惰性气体用于磨煤阶段煤粉干燥利用的新途径。

### 4. 污染治理或环境修复效果

尾气中  $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$  和  $\text{CH}_4$  等组分均可被催化净化为  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$ ，转化效率接近 100%。排气出口  $\text{CO}$  浓度  $< 120\text{mg/m}^3$ ， $\text{H}_2$

浓度 $<2\text{mg}/\text{m}^3$ 。以  $30000\text{m}^3/\text{h}$  尾气净化为例，年减排液氮洗尾气  $2.4\text{亿 m}^3$ ，年减排  $\text{CO}_2$  约 1.2 万 t。

## 5. 技术示范情况

该技术已在云南天安化工有限公司、云南大为制氮有限公司示范应用。2018 年在云南天安化工有限公司建立了全球首套全气量液氮洗尾气催化净化及资源化利用工业装置，规模  $30000\text{m}^3/\text{h}$ 。设备已稳定运行超过 5 年，关键指标及各性能参数均满足设计要求，废气净化及资源化效率近 100%，排气出口  $\text{CO}$  浓度 $<120\text{mg}/\text{m}^3$ ， $\text{H}_2$  未检出。分段氧化催化剂可循环回收使用，系统集成度高，无废水和固体废物产生。

## 6. 投资估算

以  $30000\text{m}^3/\text{h}$  尾气净化工程为例，工程投资 2380.5 万元。其中固定资产 1481.5 万元，其他（无形资产、催化剂、试验费用等）899 万元。

## 7. 投资回收期

以  $30000\text{m}^3/\text{h}$  尾气净化工程为例，税前的投资回收期 1.5 年，税后的投资回收期 2 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

该技术可减少含化学能低热值气体排放导致的资源浪费和环境污染，推动化工、冶金行业低热值气体净化及资源化利用，实现节能减排，契合国家“碳达峰、碳中和”的重大战略需求，具有广阔的应用前景。

## （二十八）火化机烟气多种污染物高效协同脱除超低排放技术与装备

### 1. 技术名称

火化机烟气多种污染物高效协同脱除超低排放技术与装备

### 2. 适用范围

殡仪馆火化机烟气经急冷、布袋除尘、活性炭吸附等处理后的多种污染物协同脱除。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

以窄脉冲放电为核心技术处理火化机烟气，研发了纳秒级高压脉冲等离子电源、反应器和梅花齿一筒式放电极。目前火化机烟气传统工艺为烟气降温和布袋除尘，难以稳定达到国家相关排放标准要求。该技术中，火化机烟气经传统技术处理后，再进入窄脉冲放电综合一体化装置进一步处理，实现  $\text{NO}_x$ 、二噁英、恶臭气体等多种污染物协同脱除和粉尘的超低排放，填补了传统工艺的技术不足和空白，尤其是实现了二噁英等物质去除，烟气排放口粉尘浓度  $< 5\text{mg}/\text{m}^3$ ，二噁英浓度  $< 0.2\text{ngTEQ}/\text{m}^3$ ，恶臭  $< 600$ （无量纲），其他污染物大浓度幅度降低，基本实现了火化机烟气的超低排放。设备纳秒级脉冲高压电源的输出功率 90%，上升沿脉宽  $< 300\text{ns}$ ，纳秒级高压重复频率  $> 1800\text{Hz}$ 。技术路线如图 1 所示。

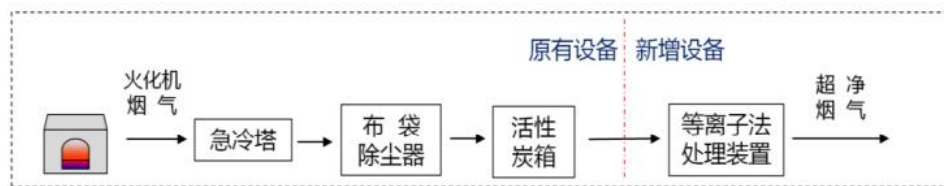


图 1 火化机烟气多种污染物高效协同脱除超低排放技术路线

### 3.2 主要创新点

(1) 设计了适用于高波动工况下的火化机烟气直接等离子法一体化超低排放工艺，实现对恶臭气体、二噁英、氮氧化物等多种污染物高效协同脱除。

(2) 研发了高重复频率纳秒级高压脉冲等离子体电源，配合无功电能回收电路，可将等离子体电源的效率提升至 75%，能耗降低 25%。

(3) 设计了与纳秒级脉冲电源相匹配的梅花齿一筒式电晕放电装置和适配的离子体电源倍频电路。

(4) 研发了环保装备远程运维系统，通过智能化远程数据采集、数据分析、智能控制技术综合运用，实现了环保装备远程在线运维。

### 4. 污染治理或环境修复效果

以金华市殡仪馆火化机烟气处理项目为例，经第三方检测，恶臭气体去除率 > 81%，二噁英去除率 > 84%，颗粒物去除率 > 89%，氮氧化物去除率 > 65%，颗粒物等参数排放达到超低排放

水平，SO<sub>2</sub>、HCl 等接近于零排放。

### 5. 技术示范情况

该技术已于2019年在金华市殡仪馆火化机尾气治理项目中应用,设备运行效果良好，烟气出口 NO<sub>x</sub>、颗粒物、SO<sub>2</sub>、二噁英、氯化氢、汞及其化合物（以 Hg 计）的排放浓度分别稳定实现 ≤100mg/m<sup>3</sup>、≤5mg/m<sup>3</sup>、≤20mg/m<sup>3</sup>、<0.2ngTEQ/m<sup>3</sup>、≤20mg/m<sup>3</sup>、≤0.05mg/m<sup>3</sup>，烟气黑度（林格曼黑度）<1。

### 6. 投资估算

每台火化机烟气多种污染物高效协同脱除超低排放装备费用 350 万元，技术寿命约 12 年。

### 7. 技术成果转化推广前景

该技术主要面向经济发达省市或有超低排放需求的大中型殡仪馆、动物尸体无害化处理中心，预计未来 10 年内以每年 30% 的幅度增长，推广应用前景广阔。

## （二十九）地下污水处理厂恶臭生物治理技术

### 1. 技术名称

地下污水处理厂恶臭生物治理技术

### 2. 适用范围

地下污水处理厂污水及污泥处理过程中产生的挥发性有机物及恶臭治理。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

将各污染源的废气收集后集中送到生物滤池，废气经加湿除尘后，通过湿润、多孔和充满活性的微生物填料层，首先填料及生物膜对污染物进行吸附，然后填料内外附着的专性微生物对污染物进行吸收和降解，将污染物质分解成  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  等无毒无害的简单无机物。

预洗池位于生物滤池的前端，预洗池内部配有喷淋系统，包括喷淋管道、喷嘴、接头、支撑件等。预洗池壳体侧面带有观察窗，便于观察和检修。预洗池主要用于去除气体中的颗粒物和可溶于水的成分，并调节气体的湿度和温度。同时，预洗池作为缓冲器，可降低高浓度污染负荷的峰值。

生物滤池主要功能为使废气通过湿润、多孔和充满活性微生物的滤层，微生物细胞对废气物质进行吸附、吸收和降解。生物滤池是废气处理的核心工艺段，经净化处理后气体由排气管排出。

恶臭治理工艺流程如图 1 所示。

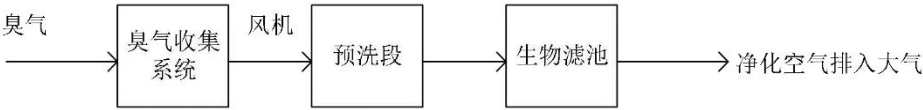


图 1 恶臭治理工艺流程图

### 3.2 主要创新点

(1) 开发了兼具营养缓释性能并负载功能微生物的生物复

合填料，拥有较高的孔隙率适合细菌生长，有良好的吸附性提升废气的传质效率，有较好的 pH 缓冲能力以维持微生物稳定的生长环境，有足够的强度保持填料层正常的物理特性和通透性。

(2) 针对地下污水处理厂污水及污泥处理过程中的 VOCs 及恶臭气体成分，筛选出高效专性苯系物降解菌、硫系物降解菌、短链烃降解菌等，并在此基础上研制出了高效复合功能菌剂。

(3) 针对化工行业有机废气中存在的大量难溶组分，研发出气液传质增溶技术，利用环糊精外部亲水内部疏水的特性，使得气相中的难溶解 VOCs 更易于突破气液传质阻力进入液相，进而被氧化分解，同时通过催化剂提升生化反应速率，从而缩短废气停留时间，减少生物滤池的占地面积，节省废气治理成本。

(4) 将物联网技术与恶臭及 VOCs 治理技术相结合，形成系统的智慧化运营模式。

#### 4. 污染治理或环境修复效果

排放气体浓度符合《恶臭污染物排放标准》(GB14554-1993) 要求，氨气、硫化氢去除率 > 98%，恶臭去除率 > 85%。

#### 5. 技术示范情况

该技术已在 40 个项目中应用。花山净水厂废气生物处理工程项目安装了 4 套生物除臭装置，总处理气量 134900m<sup>3</sup>/h。在无其他臭源干扰的情况下，处理尾气满足 GB18918-2002 厂界二级标准和《大气污染物综合排放标准》(GB16297-1993) 表 2 二级标准，年去除硫化氢 3.50kg、氨气 1.75kg，大大改善了周边环境。

## 6. 投资估算

以处理气量 10000m<sup>3</sup>/h 生物处理装置为例，主要设备及其他附属设备的投资约 55 万元，平均使用寿命超过 15 年。

## 7. 技术成果转化推广前景

该技术可在珠三角乃至全国的市政行业恶臭气体治理领域推广应用，并可拓展至其他行业工业恶臭气体治理，市场前景良好。

### （三十）低浓度复杂有机废气生物净化过程强化技术

#### 1. 技术名称

低浓度复杂有机废气生物净化过程强化技术

#### 2. 适用范围

石油、化工、制药、食品、印染、污（废）水处理等行业产生的 VOCs 及恶臭废气治理。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

研发了真（细）菌协同代谢复合菌剂等生物活性功能材料，净化单元的处理负荷提高 2 倍以上，装置体积减小 40% 以上。研制了两相板式生物净化装置，对正己烷、甲苯等低水溶性 VOCs 的传质单元数提高 60% 以上；构建了高能粒子氧化—生物耦合净化工艺，二氯甲烷、苯乙烯等难降解 VOCs 的去除负荷提高 2 倍左右，去除率从 30% 提升至 95% 以上。通过“材料—工艺—装备”创新，构建了完整的产业技术链，实现了低浓度复杂有机废气安全低碳净化。

### 3.2 主要创新点

(1) 发明真(细)菌协同代谢的复合菌剂, 实现废气多污染组分的快速降解。选育疏水性污染物高效降解真菌, 基于共代谢机理, 突破菌间代谢差异效应, 构建协同代谢的真-细菌功能菌群, 典型污染物的比降解速率提升 60%~120%; 采用序列混菌培养模式, 开发基于炭质载体的高密度混合发酵技术, 制备了适合常温保存的功能菌和广谱菌群配合的复合菌剂, 攻克了菌剂难以长效保存的技术难题, 实现复合菌剂规模化生产应用, 大幅缩短了净化装置启动时间。

(2) 剖析多孔介质流场特征, 发明多层板式结构生物净化设备, 突破现有单层结构污染负荷和生物量分布不均、填料层易堵塞及污染物降解互为抑制等瓶颈。采用交联负载技术, 强化填料亲水性和高比表面积设计, 开发了营养缓释功能复合填料和高生物固着力纹翼填料, 解决了传统生物系统需额外添加营养、压升高及使用寿命短等技术难题。基于“双膜理论”与相似相溶原理, 构建以非水相介质为“桥梁”和“储存库”的 VOCs 净化两相分配体系, 发明生物相容性高、易回收的纳米磁性硅油, 突破低水溶性污染物多相间传质限制, 增强抗冲击负荷能力, 攻克了硅油相无法循环利用的难题。

(3) 基于光化学反应第一定律和线性光源球面辐射 (LSSE) 模型, 开发折流式光氧化反应装置, 提出镧氮共掺杂的  $\text{TiO}_2$  纳米管催化剂制备的新方法, 提高了光能活性粒子的利

用率，强化了光氧化能效；揭示了微量 O<sub>3</sub> 通过抑制胞外多聚物的产生进而促进生物膜活性的内在规律，构建 UV 光氧化—生物净化耦合工艺体系，有效提升难降解组分生物降解速率，彻底消除单一 UV 光解产物、O<sub>3</sub> 等对环境的二次污染。

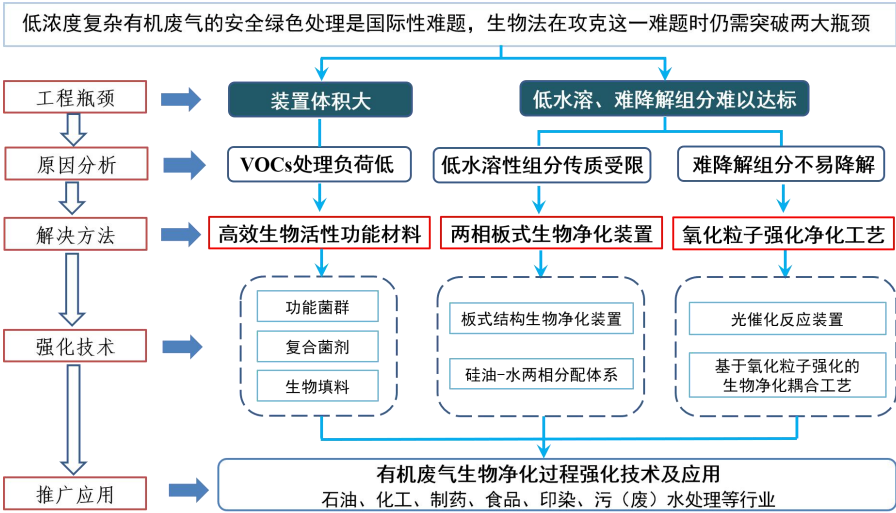


图 1 技术核心内容

#### 4. 污染治理或环境修复效果

以浙江某药厂生产车间综合废气和污水站臭气生物净化工程为例，处理后尾气中甲苯、四氢呋喃、氯仿的平均去除率分别为 99.5%、95.2%、99.7%。以实施的工程项目测算，年减排 VOCs 超过 3 万 t，对于量大面广的低浓度有机废气污染控制具有重要的意义。

#### 5. 技术示范情况

该技术已在全国 30 个省份和港澳特别行政区，以及马来西亚等“一带一路”沿线国家 50 余项工程中应用，处理规模在  $1000\text{m}^3/\text{h} \sim 830000\text{m}^3/\text{h}$ 。

浙江某大型药企生产车间综合废气和污水站臭气生物净化工程，工程规模  $7000\text{m}^3/\text{h}$ ，生产废气中含有高浓度甲苯、四氢呋喃、氯仿等组分，采用“吸附—解吸”和“吸收—精馏”工艺后可回收大部分有机溶剂。回收处理后低浓度挥发性有机废气采用 UV 光解工艺作为预处理工艺，进一步削减污染物浓度，并提高废气中污染物的可生化性。UV 处理尾气与污水站含硫恶臭废气汇集，进一步采用生物法处理。采用该技术处理后，硫化氢、氯仿、四氢呋喃、甲苯均可实现稳定达标排放。

## 6. 投资估算

按处理气量  $7000\text{m}^3/\text{h}$  进行估算，净化工艺采用 UV 光解—生物滴滤工艺，项目投资 208 万元。其中设备材料费 134 万元，基础设施建设费（含土建费用）48 万元。

## 7. 技术成果转化推广前景

该技术解决了各类生产制造企业和污水处理厂排放的多组分、低水溶、难降解有机废气生物净化效率低的问题，是一项针对复杂有机废气的安全、低碳、高效处理技术，未来推广前景良好。

（三十一）用于挥发性有机废气高效治理的疏水分子筛吸附剂

### 1. 技术名称

用于挥发性有机废气高效治理的疏水分子筛吸附剂

### 2. 适用范围

喷涂、印刷、化工、玻璃钢、制药、石化、餐饮等行业 VOCs 废气治理。

### 3. 技术内容

该技术针对生活/工业源分散式、中低浓度 VOCs 废气处理阻力降要求小、气量波动适应性好等要求，研究制备出整体蜂窝式以及转轮轻质分子筛材料，可适用于不同工况和条件，解决分子筛成型过程中易开裂、强度低、干燥速度慢、吸附性能变差等难题。各类型分子筛制成工艺路线分别如图 1、图 2、图 3 和图 4 所示。

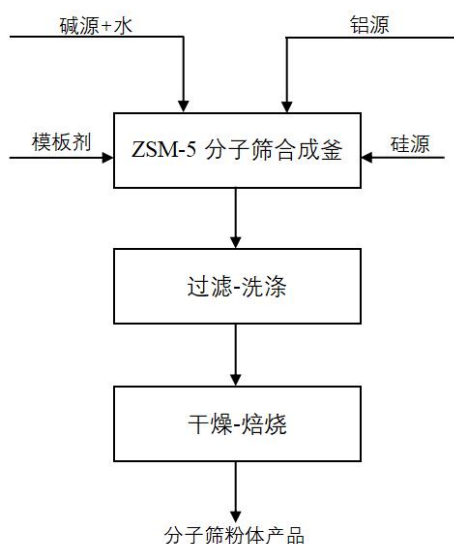


图 1 高硅疏水 ZSM-5 分子筛直接合成技术路线

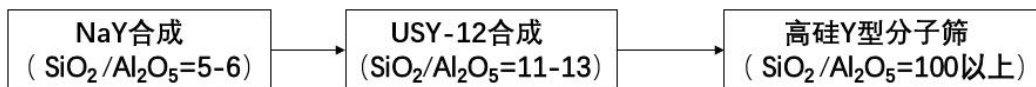


图 2 高硅疏水 Y 型分子筛改性合成技术路线

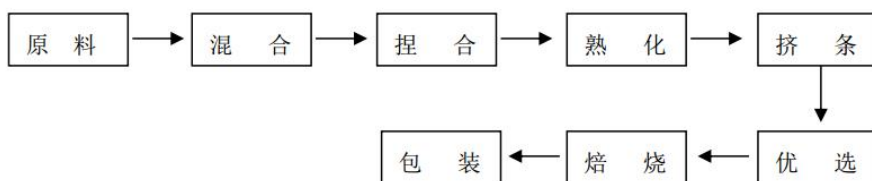


图 3 高硅疏水分子筛蜂窝体整体式成型技术路线

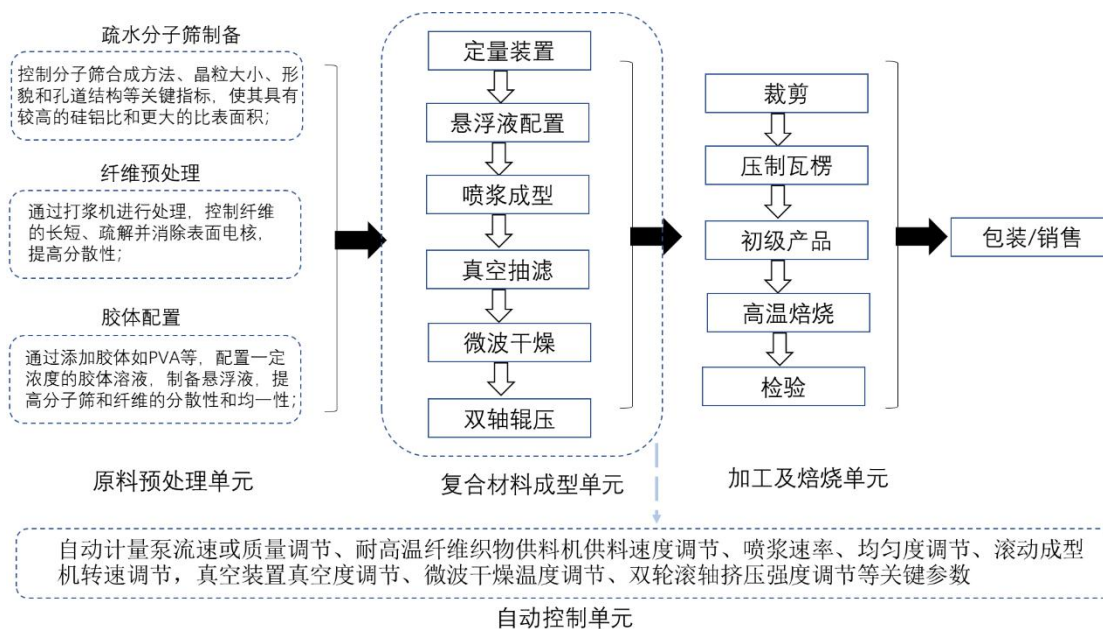


图 4 高硅疏水分子筛玻纤骨架轻质化成型技术路线

### 3.2 主要创新点

(1) 开发了高疏水性、大吸附容量的新型分子筛材料制备技术，解决了目前国产沸石分子筛吸附容量不高、吸附选择性差、吸附大分子能力有限、疏水性能达不到工程应用要求等问题，研发的分子筛产品在吸附性能上接近或达到美、日进口产品的水平。

(2) 开发了分子筛成型技术，解决了粘合剂配方、轻质材料制作、成型工艺设计、加热焙烧条件控制等方面的技术难题，攻克了基于沸石分子筛的吸附体制备工艺技术瓶颈，研发了接近或达到美、日进口产品技术水平的吸附体产品，打破国外技术和产品垄断。

### 4. 污染治理或环境修复效果

以天津空客 A320 喷漆车间挥发性有机废气排放治理改造项目为例，VOCs 喷涂废气治理排放浓度已达到 A 级企业要求，TRVOC 排放浓度稳定低于  $10\text{mg}/\text{m}^3$ ，远低于天津市《工业企业挥发性有机物排放控制标准》（DB12/524-2020）对应排放限值  $50\text{mg}/\text{m}^3$ 。

### 5. 技术示范情况

该技术应用于天津空客 A320 喷漆车间产生的挥发性有机废气排放治理改造项目，服务对象是空客在中国建设的第一条 A320 系列飞机总装线，也是空客在欧洲以外新建的第一条单通道飞机总装线。装置投运后，是目前全球唯一的飞机整机喷涂

废气深度治理工程，也是目前全球处理规模最大的分子筛固定床 VOCs 治理工程。该项目合计处理风量 65 万  $\text{m}^3/\text{h}$ ，用于飞机喷漆大厅和调漆间产生的有机废气治理，处理后整体满足《重污染天气重点行业应急减排措施制定技术指南（2020 年修订版）》（环办大气函〔2020〕340 号）绩效分级指标 B 级企业要求，排放浓度达到 A 级企业要求，远低于天津市相关排放标准要求。从 2022 年 1 月至今，运行过程中处于稳定状态。处理设施实测最低标干风量达到设计风量的 90% 以上，非甲烷总烃去除效率不低于 95%，TRVOC 排放浓度稳定低于  $10\text{mg}/\text{m}^3$ ，实现 VOCs 减排 15.8 t/a。依据飞机涂装过程不同工艺下排放情况不同的特点，采取了可自由切换减排工艺的节能措施，按照同类工程项目估算，两个机库同时运行的正常工况下，可有效节约电耗 640000 ( $\text{kW}\cdot\text{h}$ ) /t，折算为  $\text{CO}_2$  减排 638t/a。

## 6. 投资估算

天津空客 A320 喷漆车间产生的挥发性有机废气排放进行治理改造项目，合计处理风量 65 万  $\text{m}^3/\text{h}$ ，总投资约 2300 万元。

## 7. 投资回收期

天津空客 A320 喷漆车间挥发性有机废气治理改造项目采用分子筛固定床工艺，年运维费用 182 万元；若采用沸石转轮，年运维费用约 590 万元。

## 8. 技术成果转化推广前景

“十四五”时期是推动减污降碳协同增效、促进经济社会

发展全面绿色转型、实现生态环境质量改善由量变到质变的关键时期。该技术推广应用，可有效实现 VOCs 减排，减少生产企业的环境管理风险，保障企业稳定生产，同时便于环境监管，具有良好的市场前景。

## （三十二）减排型药芯复合钎料

### 1. 技术名称

减排型药芯复合钎料

### 2. 适用范围

航空航天、轨道交通、家电制冷、电力电子、超硬工具、眼镜制造等领域中铜—铜、铝—铝、铜—铝、钢—钢、钢—铜、钢—硬质合金等钎焊连接过程中钎剂的无组织排放控制。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

该技术借助钎料成分数字化设计平台，针对不同应用需求制备系列高性能无镉钎料合金；开发了精密轧制技术、多级模拉卷制技术、同步层流挤压制备等技术，制备有缝/无缝药芯钎料；通过在钎剂中复合添加活性元素、改性元素、微纳颗粒等制备活性药芯钎料和高强韧药芯钎料，钎焊时发生微区冶金、成分重构和原位反应，柔性调控钎缝界面组织，实现了对钎料成分与性能的数字化精准调控。钎焊过程中使用该产品，可避免传统实芯钎料钎剂过量造成的无组织高排放问题，减少钎焊过程中有害气体、烟尘排放。卧式液压机最大挤压力 10000KN；

挤压速度 0 ~ 10mm/s。药芯卷制速度 0 ~ 2m/s。无缝/有缝减排型药芯工艺路线如图 1、图 2 所示。

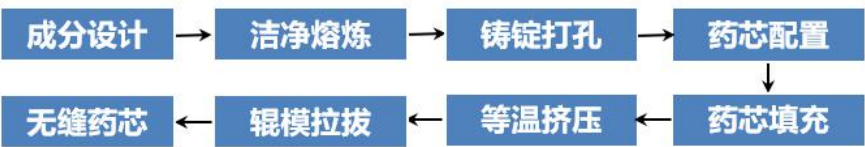


图 1 无缝减排型药芯复合钎料

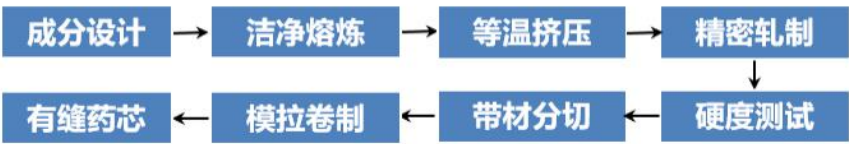


图 2 有缝减排型药芯复合钎料

3.2 主要创新点

（1）发现了多种元素与镉的等效关系，实现了无害化钎料成分设计；建立了钎料成分数字化设计平台，实现了理论预测、试验验证的研发新模式。

（2）创新钎料、钎剂结构设计，通过钎料钎剂复合一体化结构，实现了钎料钎剂精准控制，解决了传统钎焊过程中钎料、钎剂分别添加引起的焊后残留大、排放严重超标等问题。

（3）发明了螺旋搭接缝药芯复合钎料，利用螺旋搭接缝的自旋紧提高钎料自身刚度，解决了传统药芯钎料易漏粉、挺直度差、飞溅多等难题。

(4) 开发了同步层流挤压、辊模拉拔等技术，揭示了挤压加工时钎料与钎剂在温度—压力—摩擦等复杂外场力下相互作用的行为，解决了易断粉、断丝、活性损失等难题。

(5) 开发了高性合金丝、微纳颗粒增强药芯钎料，通过微区冶金、成分重构和原位反应，实现钎缝界面组织柔性调控，提高了钎焊接头性能。

#### 4. 污染治理或环境修复效果

以直径为 6mm 的冰箱制冷管路焊接为例，与传统钎料相比，减排型药芯复合钎料单焊点钎料金属用量减少 30% 以上，钎剂用量减少 40% 以上，符合电子电气设备中限制使用某些有害物质指令（RoHS）的要求。

与传统实芯银钎料相比，减排型药芯复合钎料钎焊时无需添加钎剂，实现了钎料、钎剂的复合使用，避免了钎剂残留物过量造成的环境污染问题。

#### 5. 技术示范情况

减排型药芯复合钎料已在家电制冷、超硬工具、眼镜等典型行业重点企业推广应用。与传统实芯钎料相比，钎焊单个焊点钎料、钎剂用量减少；钎料熔化速率提升，单把焊枪手工施焊焊点数增加，在节省材料、减少排放的同时提高了生产效率。

#### 6. 投资估算

按年产能 100000 公斤钎料规模计算，普通成形设备费及辅助检测设备费近千万元。

## 7. 投资回收期

项目正常运行后，预计投资回收期约 1 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

减排型药芯复合钎料已在海信、三菱重工示范应用，满足了航空航天、轨道交通、现代制冷、超硬工具、汽车制造、高档眼镜等行业的钎焊应用需求，契合了制造业绿色化、自动化、智能化发展方向，具有广阔的市场前景。

## （三十三）满足国 VI 排放标准的机动车尾气治理催化剂制备技术

### 1. 技术名称

满足国 VI 排放标准的机动车尾气治理催化剂制备技术

### 2. 适用范围

满足国 VI 排放标准的天然气车、汽油车、柴油车尾气排放处理。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

##### （1）研发了满足国VI排放标准的天然气车催化剂

采用双溶剂法等技术提高贵金属分散度及贵金属分层配置，提高催化剂的低温活性，解决冷启动带来的污染物浓度高和净化难等问题；采用结构和电子助剂稳定催化剂结构，解决当量燃烧尾气温度升高导致的催化剂劣化加快的问题；采用扩散能垒技术稳定贵金属的氧化状态，提高催化剂耐久性，解决

标准升级带来的耐久里程增加的问题，形成具有低温高活性、高温稳定性好、寿命长的国 VI 天然气车尾气治理催化剂制备技术。天然气车催化剂  $\text{CH}_4$  起燃温度  $T_{50} \leq 350^\circ\text{C}$ ，完全转化温度  $T_{90} \leq 390^\circ\text{C}$ 。涂层上载量控制偏差在 $\pm 3\%$ 以内。

### （2）研发了满足国VI排放标准的汽油车催化剂

通过表面活性剂络合技术及双金属共浸渍技术的开发，实现了贵金属高稳定高分散，提升了催化剂的低温活性和高温稳定性。通过催化剂分层、分段涂覆技术开发，降低了催化剂贵金属用量，从而降低了催化剂的成本。通过 TWC +cGPF 的应用匹配研究，掌握了满足国VI排放标准的汽油车后处理集成匹配关键技术。

### （3）研发了满足国VI排放标准的柴油车催化剂

研究采用耦合 DOC、SCR、CDPF 和 ASC 满足国VI排放标准的柴油车后处理集成技术。通过试验和数值模拟研究系统中各部分催化剂的自身特性及耦合动态特性，开发系统的控制技术，并与发动机进行匹配，从而掌握满足国VI排放标准的后处理集成匹配关键技术。

## 3.2 主要创新点

（1）通过发展的还原一氧化法、双溶剂法等技术，有效调控了贵金属的分散度和化学状态，由此形成贵金属高分散的催化剂制备技术，提高了催化剂的低温活性和耐久性；通过开发并引入新的催化材料促进  $\text{CH}_4$  和  $\text{NO}$  的耦合反应，拓宽天然气

催化剂的三效反应窗口，解决了天然气车  $\text{CH}_4$  和  $\text{NO}_x$  难处理的问题。基于以上研究，形成了同时具有低起燃温度、高转化效率及高耐久性能的国VI天然气车催化剂制备技术。

(2) 通过对催化剂材料、贵金属种类、贵金属用量、贵金属在材料中的分散性能、GPF 涂覆量等因素对催化剂性能影响研究及科学规律的探索，开发出满足国VI标准的汽油车催化剂。

(3) 采用耦合 DOC、SCR、CDPF 和 ASC，开发出满足国VI排放要求的柴油车后处理集成技术。

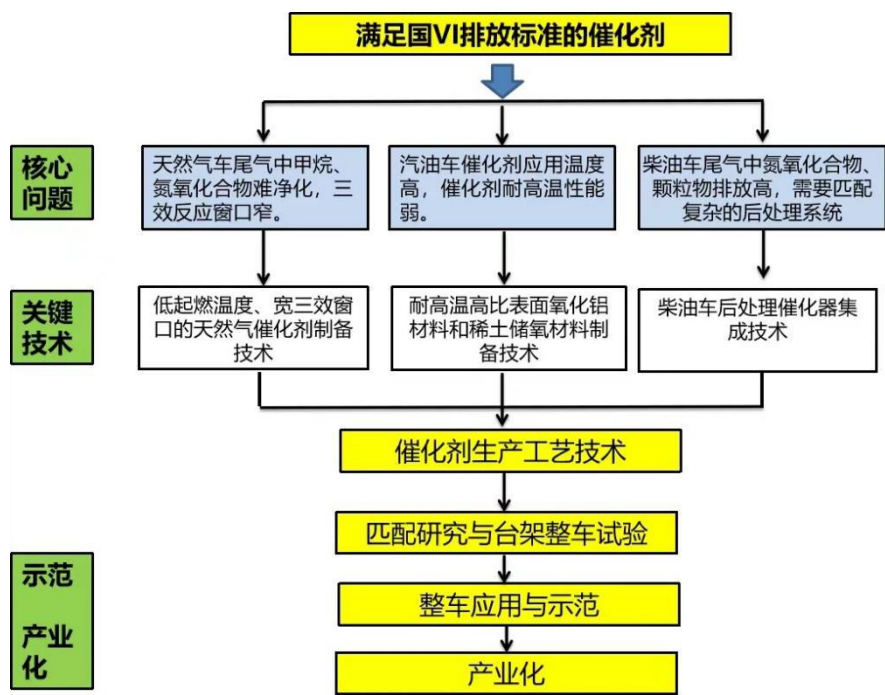


图 1 满足国 VI 排放标准的机动车尾气治理催化剂技术路线

#### 4. 污染治理或环境修复效果

应用该催化剂的替代燃料车，排放性能可达到国VI标准，降低污染物排放，改善生态环境。

#### 5. 技术示范情况

该技术开发的满足国VI标准的催化剂已在天然气车、柴油车、汽油车中应用。以在天然气车的应用为例，成功匹配了15款重型天然气发动机，匹配重型天然气车超过4000款，轻型天然气车39款，产品销售额超过30亿元，装车10万辆以上，实现一氧化碳、氮氧化物和碳氢化合物等污染物减排超过200万t，相对同等数量的柴油车减少CO<sub>2</sub>排放1700余万t。

#### 6. 投资估算

以中自环保科技股份有限公司国VIb级及以上排放标准的催化剂研发能力建设项目为例，投资额16090.18万元，包括购置设备费、工程建设费等。

#### 7. 投资回收期

以中自环保科技股份有限公司生产的满足国VI排放标准的机动车尾气治理催化剂生产为例，投资回收期约4年。

#### 8. 技术成果转化推广前景

该催化剂制备技术打破了国外的技术垄断，在行业内得到大规模应用，解决了“卡脖子”问题，同时为未来更高排放标准的汽车催化剂研发奠定了坚实的基础，提升了我国汽车行业中关键零部件的国产化比例，推广转化前景广阔。

### 三、固体废物处理处置及资源化领域

#### （三十四）有机固体废物卧式推流干式厌氧发酵技术及装备

##### 1. 技术名称

有机固体废物卧式推流干式厌氧发酵技术及装备

##### 2. 适用范围

含固率为 20%~35% 的市政、农业、工业有机固体废物厌氧发酵。

##### 3. 技术内容

###### 3.1 技术原理

该技术为干式厌氧发酵、卧式一体化、连续式、机械推流搅拌的厌氧发酵技术。在强化机械搅拌、流体仿真结构设计、强化加热装置传热能力等方面实现突破，解决了高含固物料传质传热困难的问题，避免酸积累和氨氮抑制，降低了物料预处理要求。

主要工艺流程：有机固体废物经混料仓暂存、混匀后，送入干式厌氧发酵反应器（DANAS）厌氧发酵 20d~30d，大部分可降解有机物被降解或稳定化。发酵沼气净化后，部分引入锅炉燃烧制取热水用于系统加热，大部分进一步精制后外供天然气或发电上网。发酵残渣由柱塞泵送入固液分离系统，分离为沼液及沼渣。其中，沼液经处理后可用于农作物灌溉，沼渣中有机质经进一步稳定后可加工为有机肥，也可经处理后作为营养土基质。

工艺路线如图 1 所示。

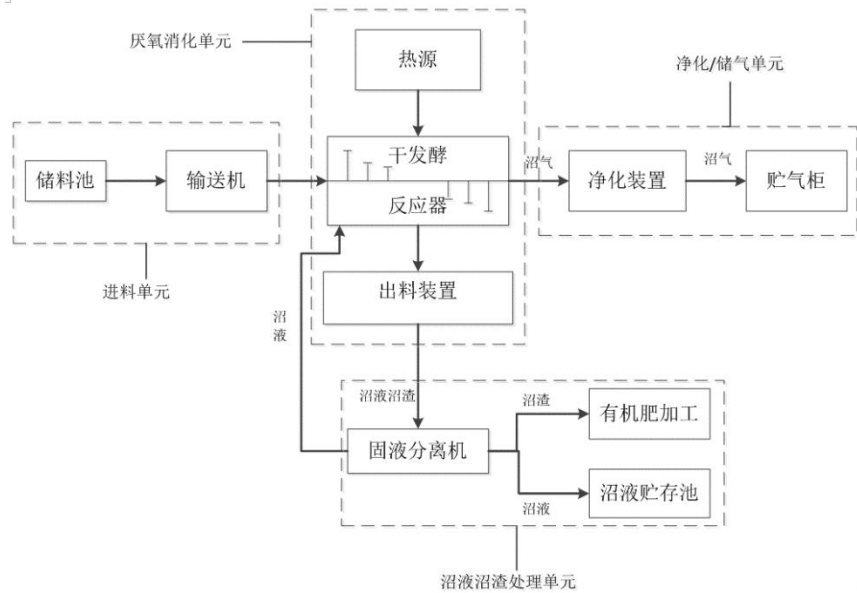


图 1 有机固体废物干式厌氧发酵技术工艺路线图

3.2 主要创新点

（1）处理的原料适应性广，预处理要求低，抗异物能力强，容杂率 > 10%。

（2）开发了卧式直通式一体化反应器和长轴推流式搅拌器，系统构成简单，可实现标准化、模块化设计和建设。单台反应器处理量 > 100t/d（按物料含水率 80%计），单台反应器容积可达 3100m³，采用 35m 超长跨距搅拌轴，搅拌功耗比小于 8W/m³，物料搅拌充分、混合均匀、流动性提高，仓内无死角，容积利用率大于 95%。

#### 4. 污染治理或环境修复效果

以肥城市畜禽污染治理与综合利用项目为例，运行后每日产沼气 10000m<sup>3</sup>（其中生物天然气 5000m<sup>3</sup>），沼液 80m<sup>3</sup>，有机肥 20t，无二次污染。生产的天然气符合《天然气》（GB17820-2018）要求，有机肥符合《有机肥料》（NY 525-2021）要求。

#### 5. 技术示范情况

该技术已应用于农业和市政等多个行业，处理的物料包括秸秆、畜禽粪便和市政污泥等，累计年处理规模达 42 万 t。目前已成功应用于肥城市畜禽污染治理与综合利用项目、睢县生物有机质处置中心项目、宜兴概念厂生物有机质项目和灌云县畜禽粪污资源化处理与利用 PPP 项目中。以肥城项目为例，处理规模为 150t/d，以畜禽养殖粪便、果蔬垃圾、秸秆等为原料，通过厌氧发酵产生沼气、沼液、有机肥等；每年可处理畜禽粪便等有机固体废物 7 万 t，可削减 COD 排放 1.7 万 t、总氮排放 500t、总磷排放 200t、二氧化碳排放 6900t，减少煤炭和化肥使用量分别为 2500t 和 1100t，肥城市粪污综合利用率由 93%提高至 96%，实现了养殖粪污“减量化、无害化、资源化”。

#### 6. 投资估算

按处理规模 100t/d（按物料含水率 80%计）估算，设备总投资 1500 万元。

#### 7. 投资回收期

按处理规模 100t/d（按物料含水率 80%计）估算，投资回收期为 6.8 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

该技术可进一步提升有机固体废物资源化处理效果，处理成本低，对有机固体废物处理产业发展具有良好的示范作用。我国有机固体废物处理正处于快速发展阶段，该技术具有良好的推广应用前景。

### （三十五）有机固体废物超高温堆肥技术

#### 1. 技术名称

有机固体废物超高温堆肥技术

#### 2. 适用范围

污泥、厨余垃圾、畜禽粪污、食品加工行业废弃物、农林废弃物等有机固体废物资源化。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

该技术在不依赖外部加热条件下，通过接种含有极端嗜热微生物的超高温好氧发酵菌剂，使堆体温度迅速上升至 80℃~100℃，并维持 5d~7d 超高温期，堆体温度维持在 80℃以上是超高温堆肥工艺的核心技术特征。

以脱水污泥为原料的超高温堆肥工艺路线：首先将城镇生活污水处理厂的脱水污泥（简称鲜料，含水率 60%~80%）与已发酵腐熟干料（简称返混料，含水率为 30%）混合均匀，添

加 0~5%的辅料（谷壳、秸秆、菇渣等）调节堆体含水率和碳氮比（C/N），然后添加 0.5%的液体超高温好氧发酵菌剂至混合后的原料中，转运至发酵槽，保持堆体高度约 2.5m，单槽总物料量 100t 左右，同时开启鼓风机曝气供氧，前期每隔 2d 左右翻堆混匀物料，后期可以增加翻堆频率以加速水分蒸发和腐熟，具体流程如图 1 所示。

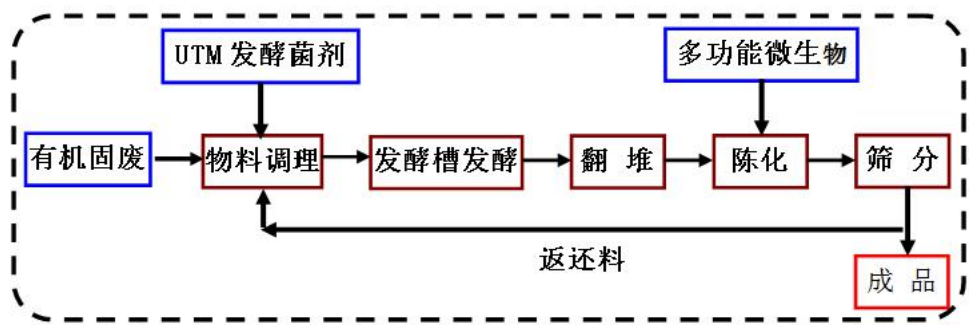


图 1 脱水污泥超高温堆肥工艺路线

### 3.2 主要创新点

（1）发明了超高温好氧发酵菌剂，提高堆体温度至 80℃~100℃，形成超高温堆肥新技术。解决了传统堆肥发酵温度低（<70℃）、高温持续时间短等难题。

（2）发明了有机高湿物料超高温堆肥新工艺与技术，并开展工程应用。

（3）建立了超高温堆肥二次污染控制技术体系，重金属钝化和微塑料快速降解技术，发明了快速检测腐熟度的生物电化

学新方法，研制出有机铁肥等系列高值化堆肥新产品，解决了传统堆肥产品附加值低、土地安全利用难等问题。

#### 4. 污染治理或环境修复效果

在  $80^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$  持续高温条件下，堆体中病原菌、蛔虫卵等有害物质可完全灭杀，堆肥快速达到腐熟，并且实现了抗生素耐药性基因消减、重金属钝化和温室气体减排。物料经堆肥后产品质量符合《城镇污水处理厂污泥处置园林绿化用泥质标准》（GB/T 23486-2009）要求。

#### 5. 技术示范情况

该技术成果已推广应用至北京、河南等 12 个省份的 20 多个项目。北京顺义超高温好氧发酵污泥综合处置工程，污泥处理规模为  $500\text{t/d}$ （按含水率 80% 计），发酵过程中无需外加热源，仅依靠微生物自身新陈代谢产热，可在 24h 内提高堆体温度至  $80^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ 。有机物料经超高温好氧发酵 15d 后，物料完全腐熟，种子发芽指数  $\geq 80\%$ ，病原菌、蛔虫卵死亡率  $\geq 99\%$ 。堆肥中有机物含量  $\geq 45\%$ ，氮磷钾总养分  $\geq 5\%$ 。

#### 6. 投资估算

按设计处理规模  $500\text{t/d}$ 、占地面积  $5000\text{m}^2$  计，设备投资 3607 万元，单位投资 721.4 万元/100t。

#### 7. 投资回收期

以北京顺义  $500\text{t/d}$  污泥处置项目为例，投资回收期 5~6 年。

#### 8. 技术成果转化推广前景

与传统高温堆肥技术相比，超高温堆肥技术具有发酵效率高、氮素损失小、堆肥腐熟效果好、产品质量高等优势，具有广阔的应用前景。

### （三十六）污泥桨叶式干化和流化床焚烧集成技术

#### 1. 技术名称

污泥桨叶式干化和流化床焚烧集成技术

#### 2. 适用范围

污水处理厂污泥、工业污泥（如造纸、印染、制革等行业产生的污泥）、江河湖泊底泥处理处置。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

桨叶式污泥干化机采用装卸式变角度搅拌、固定式叶片送料、热源多点多段供热、干化尾气热能回用等多项技术措施，提高对黏稠污泥的适应性、传热效率和设备本身的热效率。流化床污泥焚烧炉采用炉膛内部循环和炉外旋风分离回送技术，采用异比重床料，通过高温空气预热和冷热多级送风，结合半绝热膜式壁锅炉炉墙，以及飞灰分离回送和全顺列、大节距受热面布置，保证炉膛温度分布均匀，提高污泥燃尽率，改善飞灰沉积、烟道堵塞和壁面腐蚀等问题。焚烧烟气经静电除尘器、袋式除尘器、烟气洗涤塔等处理后达标排放。

250m<sup>2</sup>四轴桨叶式污泥干化机水分蒸发能力为 4t/h，蒸发强

度 10kg 水/ ( m<sup>2</sup>·h ), 锅炉热效率大于 80%。

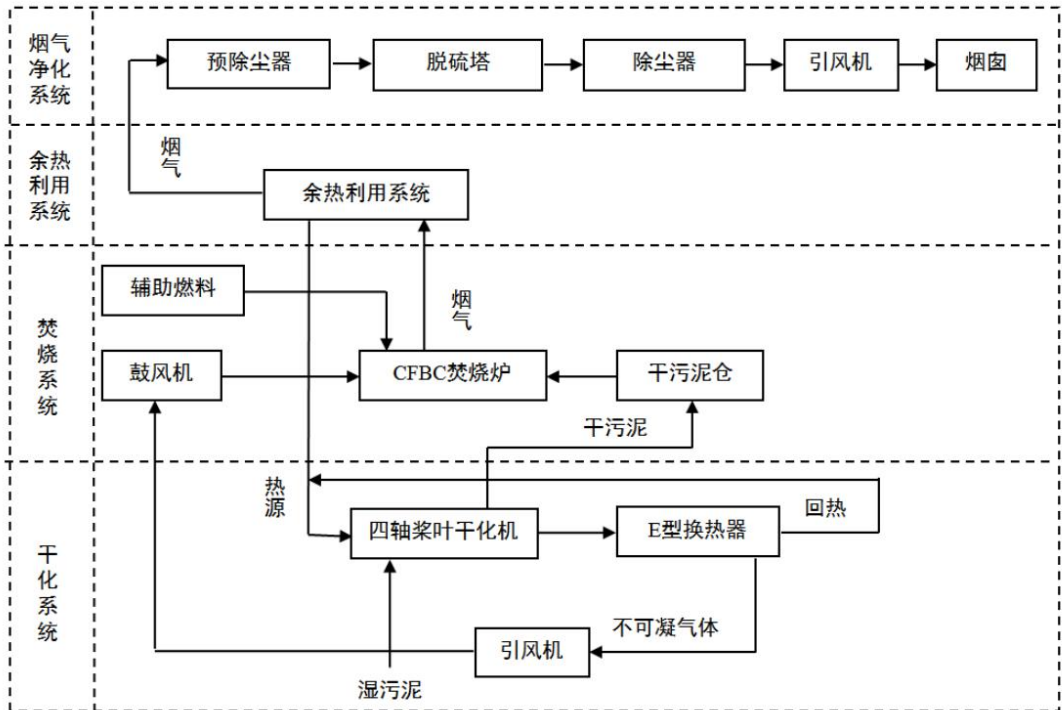


图 1 污泥干化焚烧系统技术流程图

### 3.2 主要创新点

#### (1) 四轴桨叶式污泥干化机创新点

根据污泥在干化设备内部黏滞特性的空间分布，采用可装卸式变角度羽根搅拌和固定式叶片送料，提高对黏稠污泥的适应能力；设计了换热表面的短肋片以达到强化传热的目的；采用热源多点多段进入的方式增加换热的平均温差；通过干化尾气热能回用，提高了污泥干化设备的热效率。

#### (2) 流化床污泥焚烧炉创新点

通过物料循环有效调节炉内颗粒浓度，提高污泥的燃尽率，并保证了炉膛上下温度分布的均匀性；采用异比重床料，通过高温空气预热和冷热多级送风，结合半绝热膜式壁锅炉炉墙，保证了低热值污泥的稳定燃烧；采用飞灰分离回送和全顺列、大节距受热面布置结合抗腐蚀管材和防磨鳍片，有效改善了飞灰沉积、烟道堵塞和壁面腐蚀，提高系统运行的可靠性。

#### 4. 污染治理或环境修复效果

含水率 85% 的湿污泥干化至含水率 40% 时，体积可减少至原来的 1/4。干化后的污泥经焚烧后减量 90% 以上，有机物分解彻底，烟气净化后达标排放，焚烧产生的能源可回收利用，灰渣可实现综合利用。

#### 5. 技术示范情况

嘉兴新嘉爱斯热电有限公司污泥干化焚烧工程（二期）污泥处理量 800t/d，采用 250m<sup>2</sup> 四轴桨叶式污泥干化机，干化至含水率 40% 后送至流化床锅炉进行焚烧。该设备自 2015 年 5 月至今连续运行，达到如下技术参数：水分蒸发能力 4t/h，蒸发强度 11kg 水/（m<sup>2</sup>·h），热耗量 675kcal/kg 水，设备无故障运行时间 8000h/a，污泥干化焚烧后减量 90%。

绍兴中环可再生能源公司 4# 污泥焚烧锅炉处理量 700t/d，设计工况是纯烧 700t/d 含水率 45% 的污泥，蒸发量 39t/h。锅炉热效率大于 80%，运行时间 8000h/a，尾气经处理达到国家标准后排放，运行情况良好。

## 6. 投资估算

新建污泥干化焚烧系统投资 30 万 ~ 40 万元/t 湿污泥 (不含土建)。系统包括: 脱水污泥接收、储存和给料、污泥干化、焚烧 (含余热锅炉)、烟气净化、除臭、燃烧辅助、冷却水及其他配套辅机系统 (如电仪系统)。其中干化系统投资占 25%, 焚烧系统投资占 35%, 其他部分投资占 40%。

## 7. 投资回收期

投资回收期约 10 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

随着我国社会经济的快速发展, 工业化水平的不断提升, 城镇污水处理厂的数量和规模不断增加, 城市污泥的产生量持续增加。污泥干化焚烧是一种高效快速、节能减排的污泥无害化处置方式, 可以使污泥体积减量 90%, 回收污泥中的能量, 高温能够杀死病原体, 焚烧后的灰渣可制成建材产品, 实现污泥“减量化、稳定化、无害化、资源化”, 具有较好的推广应用前景。

### (三十七) 新型污泥喷雾干化一回转窑焚烧技术

#### 1. 技术名称

新型污泥喷雾干化一回转窑焚烧技术

#### 2. 适用范围

污泥处理处置。

#### 3. 技术内容

### 3.1 技术原理

采用新型干燥系统与焚烧系统的集成装置，将污泥雾化后，利用焚烧产生高温烟气的热量干化污泥。采用自动化控制技术，根据雾化污泥含水率的不同，将干燥污泥含水率控制在至少能够保证干化焚烧系统热能平衡的较小波动范围之内，确保焚烧系统产生高温烟气的热量能够干燥雾化污泥，并有效控制二噁英的合成。焚烧尾气采用布袋除尘、臭氧除臭、湿法喷淋、脱白等工艺处理达标后排放。

干化塔出泥温度  $50^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ ，出泥含水率约 20%；进入喷雾干燥塔塔顶的高温烟气温度约  $650^{\circ}\text{C}$ ，二燃室高温烟气温度  $850^{\circ}\text{C} \sim 900^{\circ}\text{C}$ 。

工艺流程如图 1 所示。

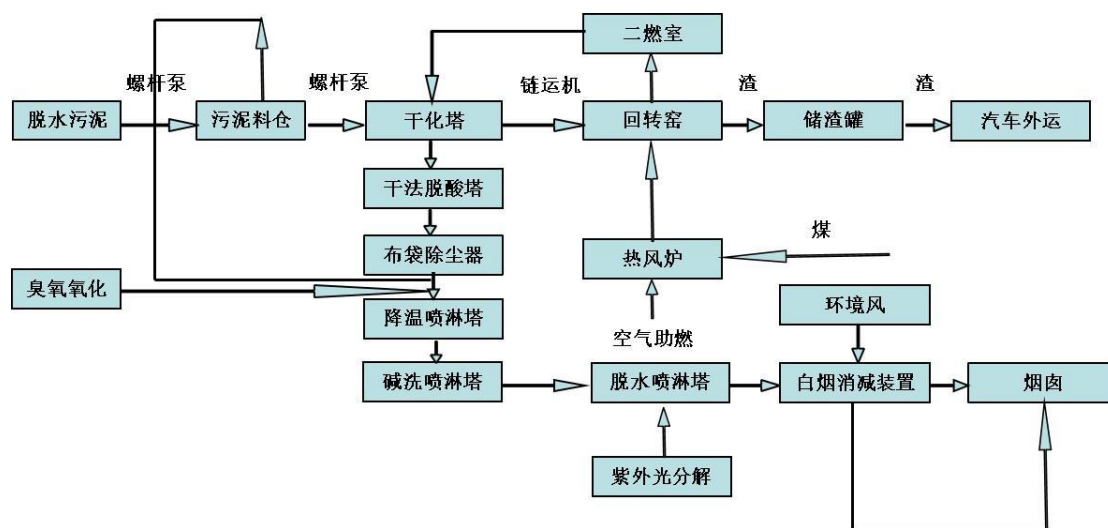


图 1 新型污泥喷雾干化—回转窑焚烧技术工艺流程图

### 3.2 主要创新点

(1) 开发了新型污泥喷雾干燥关键技术、新型喷雾干燥器与回转式焚烧炉系统集成，实现污泥干燥焚烧集成技术国产化，降低污泥处理处置成本。

(2) 采用高效尾气处理技术，实现污泥干燥焚烧尾气高效处理和二噁英的有效控制。

(3) 采用臭氧+紫外除臭组合技术有效脱硝除臭。

(4) 采用脱白技术实现超低排放。

### 4. 污染治理或环境修复效果

以安吉净源污水处理有限公司污泥综合处置项目为例，污泥减量率 $\geq 90\%$ ，焚烧炉出口烟气中污染物浓度达到《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485-2014)表4限值要求，产生的煤渣与灰分可用于建材行业。

### 5. 技术示范情况

该技术单项工程应用项目的污泥处理规模 100t/d ~ 1200t/d，累计处理规模达 7000t/d。安吉净源污水处理有限公司 290t/d 污泥综合处置项目，包括污泥存储上料系统、污泥干化系统和污泥焚烧系统。污泥量消减率可达 90.44% ~ 91.12%，污泥焚烧后产生约 8%灰分及煤渣等工业固废，煤渣与灰分都可用于建材行业。

为保证有害气体燃尽并达到排放标准，回转窑焚烧后的气体进入二燃室。二燃室采用立式结构，保温墙体厚度 0.58m，以保证二燃室温度不低于 850℃，气体流经时间不少于 2.5s，分

解控制二噁英生成。焚烧烟气经处理后达标排放，废水进入安吉净源污水处理有限公司污水处理厂进一步处理。

## 6. 投资估算

以 290t/d 污泥综合处置项目为例，工程总投资 5058 万元。

## 7. 投资回收期

以 290t/d 污泥综合处置项目为例，税前静态投资回收期 13.26 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

该技术成熟度高，在安全处置污泥的同时能够协同处置工业固体废物，具有较好的推广价值。

### （三十八）水泥窑协同处置多源废弃物技术与装备

#### 1. 技术名称

水泥窑协同处置多源废弃物技术与装备

#### 2. 适用范围

依托新型干法水泥窑协同处置，适用于城乡一体化生活垃圾、市政污泥、危险废物及一般工业固体废弃物。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

水泥窑多源废弃物焚烧炉能够适应水泥生产线煅烧工艺，实现对多源废弃物焚烧及灰渣零排放处置。废弃物可在阶梯形层状结构的炉内稳定焚烧，通过推料翻动、抛撒两次循环，使料气均衡传热，有害物分解反应更加完全，有效解决了固体、

膏体不同相态废弃物混合焚烧集成化处置的难题。预燃炉与水泥窑的分解炉一体化设计，主体焚烧过程在预燃炉内完成，不影响水泥窑的正常运行，焚烧完成后的气体和灰渣再进入水泥窑分解炉，在热态情况下与水泥窑的装置衔接，从而实现对多源废弃物的高效协同处置。

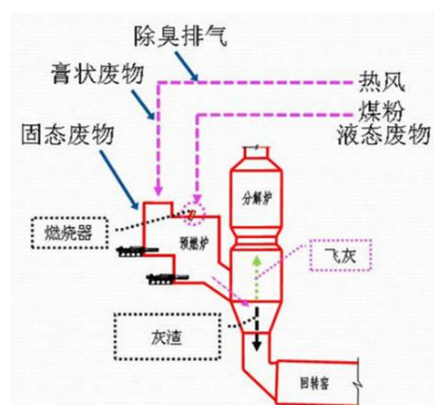


图 1 多源废弃物焚烧装置工作示意图

### 3.2 技术创新性

（1）国际首创的多相态废弃物高温焚烧分解一体化装备，发明了具有自主知识产权的水泥窑协同处置新工艺，与国际已有先进装置相比，废弃物处置种类的适应能力（>6 种）显著增强，垃圾衍生燃料替代利用率>30%，焚烧灰渣和热接近 100%协同利用。

（2）开发了预燃炉运行的精准调控技术，根本解决了多相态废弃物燃尽时间差异较大、残渣共熔引起炉床结焦的难题，相比国际先进热盘炉采取的齿轮传动与固定刮板卸料设计，适应性和稳定性显著增强，运转率（>90%）在国际工程实践上首

次实现与窑系统同步。

#### 4. 污染治理或环境修复效果

示范工程制备垃圾衍生燃料（RDF）作为替代燃料后，生产线每小时标煤的使用量在原先 21.73t 的基础上减少 6.84t，标煤替代率达到 31.5%，每年节省标煤量 5.09 万 t，实现 CO<sub>2</sub> 减排 12.7 万 t；示范工程利用钢渣、粉煤灰作为生料配料的替代原料后，合计减少 11.2% 的自然矿物资源黏土的使用量。

#### 5. 技术示范情况

河北省武安市新峰水泥有限责任公司于 2014 年度完成主体工艺开发和装备生产制造，主要设备招标完成，与成都建筑材料工业设计研究院有限公司签订工程总承包合同，依托 2 条 5000t/d 新型干法水泥熟料生产线，建设了市政污泥及生活垃圾制 RDF 水泥窑协同处置示范工程项目。

2015 年 10 月开始试运行，同年 11 月开始连续运行，目前已实现了持续稳定运行，处置生活垃圾（筛上物，RDF）约 180t/d，生活垃圾（筛下物）约 720t/d。各项数据均在国家标准范围之内，其中氮氧化物的排放量下降 20% 以上。

#### 6. 投资估算

生活垃圾水泥窑资源化处理过程的主要建设投资在于制作 RDF 过程的设备投资，约 1 亿元。运行维护费用包括生活垃圾的处理费用 124 元/t，RDF 的生产成本为 600 元/t，利用水泥窑消纳市政污泥的成本为 175 元/t 污泥。

## 7. 投资回收期

生产线每小时标煤的使用量在原基础上减少 6.84t，年节省标煤量 5.09 万 t，节省燃料 4325.6 万元。示范工程投资与运行费用分别为 8500 万元和 105 元/t，预计投资回收期约 5 年。

## 8. 成果转化推广前景

该技术已申请多项国家发明专利和实用新型专利，技术装备落地示范快，成果转化效率高，推广途径顺畅。未来 5 年我国仍将处于城镇化快速发展阶段，传统单体处理设施难以满足日益增长的生活垃圾产量和环保需求。水泥窑协同处置可以解决新建处理设施的困难，缓解生活垃圾处理压力，应用前景广阔。

### （三十九）垃圾填埋场污泥坑塘原位修复及空间利用技术

#### 1. 技术名称

垃圾填埋场污泥坑塘原位修复及空间利用技术

#### 2. 适用范围

历史遗留垃圾填埋场存量市政污泥处理处置。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

通过原位固化快速搅拌系统，将改良污泥固化剂与污泥充分搅拌混合，经过水化、矿化、离子交换反应等，在污泥体中快速形成骨架结构，胶结和包裹污泥颗粒，钝化重金属，使污泥转化成类似土壤或胶结强度很大的固体，形成固化场地。固化场地可用于封场绿化、构建生态公园、扩容构建垃圾填埋场等。建立了

全周期稳定性评估系统，保障施工安全和固化场地的长期稳定性。

该技术单次最大固化深度可达 8m，污泥坑最大固化深度可达 24m，单台设备处理能力 90m<sup>3</sup>/h ~ 110m<sup>3</sup>/h。

3.2 主要创新点

(1) 打破了污泥不易脱水和容易二次泥化的特性，降低污泥含水率，增加强度，降低有机质含量，保证污泥固化场地长期稳定性。

(2) 可实现深度污泥坑(最深可达 24m)污泥的原位处置，采用岩土工程技术和数字模型分析计算污泥固化及验收指标，创建了该技术应用的全周期稳定性评估系统。



图 1 垃圾填埋场污泥坑塘原位修复及空间利用技术工艺路线

#### 4. 污染治理或环境修复效果

以苏州七子山垃圾填埋场污泥塘治理修复项目为例，经原位固化治理后，污泥塘 10m 深度范围内抗剪强度可达 80kPa，满足《城镇污水处理厂污泥处置 混合填埋泥质》（GB/T 23485-2009）等标准要求。

#### 5. 技术示范情况

苏州七子山垃圾填埋场污泥塘治理修复项目，处理 22.8 万 m<sup>3</sup> 市政污泥。改变了污泥塘中原污泥含水率高、承载力低、臭味重等现状，原位固化治理后污泥塘 10m 深度范围内抗剪强度可达 80kPa，满足《城镇污水处理厂污泥处置 混合填埋用泥质》（GB/T 23485-2009）等标准要求。通过固化场地原位构建填埋场，可增加约 220 万 m<sup>3</sup> 总填埋库容。

#### 6. 投资估算

按照污泥处理规模计算，处理成本 350 ~ 500 元/m<sup>3</sup>。

#### 7. 技术成果转化推广前景

该技术对污泥坑周边环境扰动小，便于工程实施，施工效率高，治理后场地可二次开发利用，在处理大体量堆存的市政污泥方面具有独特优势。该技术目前已有 7 项工程应用，预计到 2025 年推广比例可达 15% 以上。

### （四十）高浓度有机废液高温熔融制合成气技术

#### 1. 技术名称

高浓度有机废液高温熔融制合成气技术

## 2. 适用范围

精细化工、制药、印染等企业产生的高浓度有机废液处理，混合入炉原料含氯、氟总量  $< 6000\text{mg/L}$ 。

## 3. 技术内容

### 3.1 技术原理

有机废物来源广泛，组分复杂，有机质含量不同，特性差异较大。低浓度有机废液与原料煤（有机固废）制备成料浆，高浓度有机废液经密闭输送系统通过气化烧嘴直接气化，料浆/高浓度有机废液与纯氧在高温条件下发生高温裂解、气化反应，生成以  $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$  为主要组分的高温粗合成气，在还原气氛下 S 主要转化为  $\text{H}_2\text{S}$ ，N 转化为  $\text{N}_2$ ，原料煤中的灰分及有机废物中的含盐组分在高温条件下转移至液态熔渣。

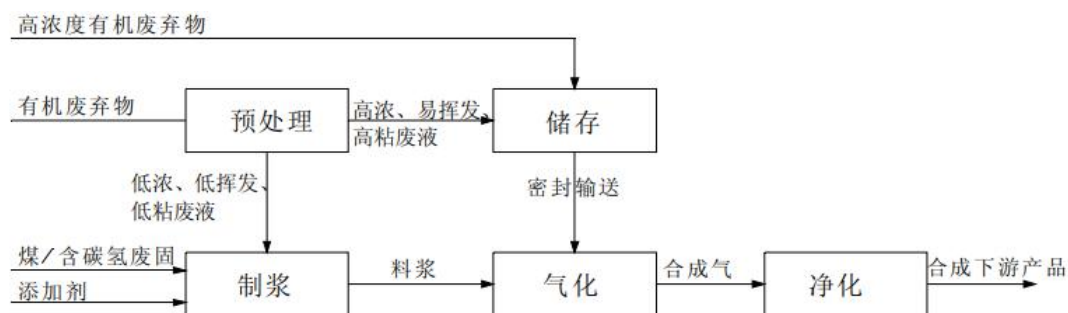


图 1 高浓度有机废物高温熔融制合成气技术路线图

### 3.2 主要创新点

该技术在湿法气流床煤气化技术研究基础上，将高浓度有机废液处理与湿法气流床气化技术有机结合，提出了一种有机

废物—煤气化绿色处理及资源化利用技术路线。

#### 4. 污染治理或环境修复效果

有机质转化率  $\geq 99.99\%$ ， $\text{CO}+\text{H}_2$  体积含量可达 80% 以上。与同规模常规煤气化技术相比，节省原料煤 10%~50%，节省制浆用水 50%~100%，外排残渣热灼减率  $< 5\%$ ，酸溶失率  $\leq 3\%$ ，水浸出有害物质含量、酸浸出有害物质含量符合国家标准，外排水经处理后循环利用。

#### 5. 技术示范情况

浙江凤登绿能环保股份有限公司水煤浆高温熔融协同处置有机废物工程示范项目，日处置各类有机废物约 200t，年产 3 万 t 合成氨，多通道工艺喷嘴技术保证了液体废物、料浆与氧气的充分混合雾化，有效提高了料浆的转化效率，装置投运后，运行稳定。经检测，在高浓度有机废液加入量为料浆加入量 30%（在多通道喷嘴内，加入量在 10%~50% 之间可调）情况下，合成氨原料下降约 20%，料浆中的碳转化率提高 1%。

#### 6. 投资估算

按新建一套协同处置 6 万 t/a 有机废液的气化装置计算，气化系统投资约 6300 万元，配套空分设备投资约 3500 万元。

#### 7. 投资回收期

按 5 万 t 合成氨气化装置协同处置 6 万 t 医药废液计算，投资回收期 2.75 年。

#### 8. 技术成果转化推广前景

该技术可大规模处置石油、医药、化工及印染行业的废液、固体废物，并经资源化利用合成甲醇、合成氨等化工产品，实现有机废物清洁处理的同时资源化利用，有效降低气化原料的消耗水平，在能源化工领域具有广阔市场前景。

#### （四十一）海洋生物贝壳粉涂料

##### 1. 技术名称

海洋生物贝壳粉涂料

##### 2. 适用范围

海洋生物贝壳粉制备涂料。

##### 3. 技术内容

###### 3.1 技术原理

该技术以天然贝壳粉为原料，利用生物基海藻酸钠、卡拉胶、瓜尔胶为基体，制备纯天然生物基涂料。该涂料在生产过程中不使用化学品，无废气产生。

配方设计路线：筛选过 1500 目筛的贝壳粉、二氧化钛、无机粉料、乳化剂、三聚磷酸钠及生物合成粘合剂等，采用正交试验优化各种原辅料的品种和组合，通过对有效成分、乳化剂、生物合成粘合剂等助剂的筛选，最终获得质量稳定、性能良好、具有抗菌功能的贝壳粉生物纯浆产品配方及制备工艺。贝壳粉涂料含固量  $\geq 50\%$ ，pH 值 7.35 ~ 7.9，漆膜外观平整光滑。加工工艺流程如图 1 所示。

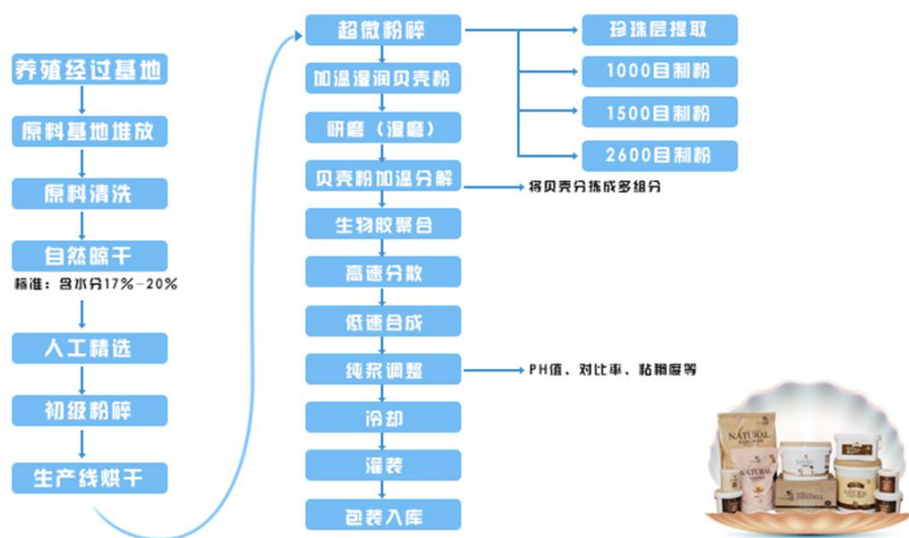


图 1 海洋生物贝壳粉涂料加工工艺流程

### 3.2 主要创新点

(1) 具有甲醛净化效能。液态贝壳粉涂料的主要原材料贝壳粉中含有的甲壳素、氨基酸、脂肪、蛋白质和诸多微量元素等有助于分解甲醛、苯等有害气体，将其分解成二氧化碳、氢或水。

(2) 具有抗菌性能。液态贝壳粉的生物特性经活化后，可有效破坏黑曲菌、土曲菌等有害菌类细胞膜，实现抗菌性能。

(3) 涂料透气性和透水性好。辅料采用的含有生物体的海藻酸钠、卡丁胶、瓜尔胶等是纯天然生物基体。甲壳素类生物粘结剂和活性物质具有良好的粘结性能和化学亲和力，可改善涂料的自流平性能和成膜性能。与化学乳胶漆相比，液态贝壳粉涂料质感天然、坚固柔滑、气味天然、透气性及透水性好，

可使墙面具备“呼吸”功能，能够自动调节室内空气湿度。

#### 4. 污染治理或环境修复效果

液态贝壳粉壁材对金黄色葡萄球菌、大肠埃希氏菌的抗菌性能分别为 99.7%和 99.3%，达到国家 I 级标准。甲醛净化效率可达 91.5%。

#### 5. 技术示范情况

青岛中德新能源与环保科技研究院室内墙面喷涂项目喷涂面积 15 万  $\text{m}^2$ ，该项目使用琴岛海洋生物液态贝壳粉涂料，在施工过程中不漏喷、不挂流，施工便捷，劳动效率提高近 10%。涂料喷涂完毕后外观厚薄均匀、颜色一致，对比率（白色和浅色）0.94，耐洗刷性 350 次，完全达到施工标准要求（要求对比率  $\geq 0.90$ ，耐洗刷性  $\geq 300$  次）。经检测，室内挥发性有机化合物、游离甲醛、苯、甲苯/乙苯/二甲苯总和均未检出。

#### 6. 投资估算

以 15 万  $\text{m}^2$  的室内墙面喷涂项目为例，工程投资 65.5 万元（含人工费、原材料费、设备费等）。

#### 7. 技术成果转化推广前景

我国涂料市场规模近 5000 亿元，涂料生产每年约消耗上千万吨石油。我国是海产养殖大国，大量贝壳垃圾亟待处理，贝壳粉生物涂料的生产和应用符合国家低碳绿色发展目标，该技术市场前景广阔。

## （四十二）生活垃圾焚烧飞灰高温烧结生产建材基材技术

### 1. 技术名称

生活垃圾焚烧飞灰高温烧结生产建材基材技术

### 2. 适用范围

生活垃圾焚烧飞灰、其他固废焚烧灰渣、污染土壤、污泥处理。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

该技术利用高温烧结的方式，将重金属和氯盐挥发至烟气再浓缩富集于浓缩灰中，二噁英在高温环境下几乎彻底分解，配合急冷降温，避开再合成温度段，结合脱酸、除尘工艺使烟气达标排放。

工艺路线为：将飞灰与辅助原料混合，在  $1250^{\circ}\text{C} \sim 1300^{\circ}\text{C}$  温度下高温烧结，烧结过程中易挥发重金属以氯盐形式挥发进入烟气，最终被捕集进入浓缩灰；同时，飞灰基质在高温烧结下固体颗粒间发生熔化与黏结作用，形成致密化且具有一定强度的稳定烧结体，难挥发重金属被固化在烧结体的致密矿物晶格中，确保固化体的永久稳定，得到重金属总量和浸出量双降低的建材基材产品。烧结烟气因负压作用流向窑尾进入烟气处理系统，先后经二燃室、急冷降温（避免二噁英再合成）、半干法脱酸、活性炭吸附、布袋除尘净化达标后排放，布袋除尘器收集的浓缩灰暂存于封闭储罐中。工艺流程如图 1 所示。

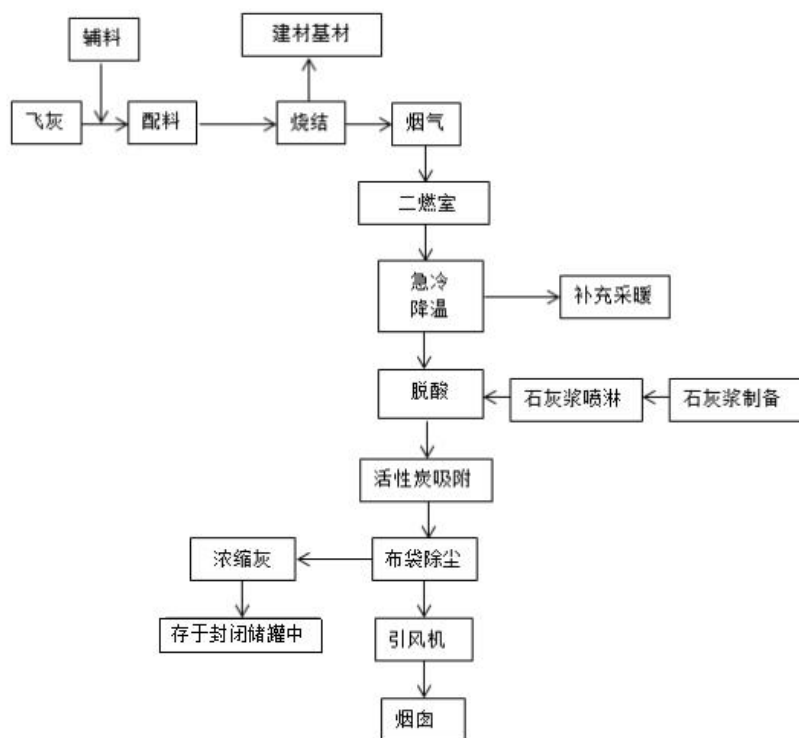


图 1 焚烧飞灰制备高温烧结建材基材工艺流程图

### 3.2 主要创新点

(1) 在飞灰本身含有的重金属挥发助剂作用下将重金属高温分离出来，大幅降低了飞灰建材产品的重金属含量；同时，将挥发后剩余的微量重金属进一步固化在建材产品的硅酸盐矿物晶格内，实现了建材基材的重金属含量和浸出量双降低。

(2) 集成了二噁英高温分解、急冷降温技术，避免了烧结过程中二噁英再合成；并辅以活性炭喷射捕集，捕集逃逸的二噁英，使烟气中二噁英浓度稳定达到国家标准要求。

### 4. 污染治理或环境修复效果

飞灰基质高温烧结下固体颗粒间发生融化与黏结作用，形

成致密化且具有一定强度的稳定烧结体，难挥发重金属被固化在烧结体的致密矿物晶格中，确保固化体的永久稳定，得到重金属总量和浸出量双降低的建材基材产品。焚烧烟气净化后达到《危险废物焚烧污染控制标准》（GB 18484-2020）要求。

## 5. 技术示范情况

天津市固体废物集中处置与综合利用中心承担了天津市绝大部分及北京市部分生活垃圾焚烧飞灰资源化处置任务，飞灰烧结示范生产线设计处理能力 5 万 t/a，飞灰与辅料充分混合后由窑尾进入回转窑，窑内焚烧温度在 1250℃以上，废物在窑内停留时间约 45min，通过回转窑转动，物料逆向流向窑头完成烧结固化，烧结产物经窑头卸料、冷却、分选后得到不同粒径的建材基材产品。

烧结烟气因系统负压作用流向窑尾进入烟气处理系统，先后经二燃室、急冷降温、半干法脱酸、活性炭吸附、布袋除尘净化达标后由烟囱排放，布袋除尘器收集的浓缩灰暂存于封闭储罐中。

## 6. 投资估算

按飞灰处理规模 5 万 t/a，运营期 20a 计算，工程总投资约 9500 万元。

## 7. 投资回收期

按飞灰处理规模 5 万 t/a 计算，投资回收期约 6a。

## 8. 技术成果转化推广前景

该技术及配套设施建设符合国家及发达省市的政策规划，满足飞灰产量剧增、填埋空间日益紧缩、急需资源化处置的市场需求，具有广阔的推广前景。

### （四十三）高盐有机废水及工业废盐资源化技术

#### 1. 技术名称

高盐有机废水及工业废盐资源化技术

#### 2. 适用范围

精细化工、煤化工、合成材料等行业生产过程中副产的以氯化钠为主，同时伴有氯化钾、硫酸钠、苯系物、氯代烃类等多种物质的固体废物处理利用。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

针对单一工业废盐，开发“负压干燥—多层悬浮氧化炉—高温回转氧化炉”组合处置工艺。在负压干燥部分，考虑工业盐中含水量对后期高温氧化过程中有机污染物氧化效率的影响。在多层悬浮氧化部分，考虑炉中的停留时间、助燃空气过剩系数、炉膛内氧气含量、多层悬浮氧化炉炉内温度等因素对有机污染物初步消除效率的影响。在高温回转氧化部分，考虑炉膛内氧气含量、回转氧化炉内温度、渣盐在回转氧化炉内停留时间等因素对工业盐中难以降解的大分子有机污染物或未被完全分解的残留有机污染物分解效率的影响。

针对多种混合工业废盐，开发“负压干燥—高温液化氧化

炉”组合处置工艺。在负压干燥部分，考虑工业盐中含水量对后期高温氧化过程中有机污染物氧化效率的影响。在高温液化氧化部分，考虑炉膛内氧气含量、高温液化氧化炉炉内温度、渣盐在炉内停留时间等因素对有机污染物去除效率的影响。

高温回转氧化炉工作温度  $650^{\circ}\text{C} \sim 800^{\circ}\text{C}$ ，氧化时间约 40min；高温液化氧化炉工作温度  $900^{\circ}\text{C} \sim 1100^{\circ}\text{C}$ ，氧化时间约 120min。

### 3.2 主要创新点

(1) 开发了针对单一工业废盐的“负压干燥—多层悬浮氧化炉—高温回转氧化炉”组合处置工艺，有机物分解效率高，物料在多层悬浮氧化炉内受热均匀，盐粒处于悬浮状态，气体与固体混合强烈，物料的燃烧在短时间内就可以完成，避免结团结块。

(2) 开发了针对多种混合工业废盐的“负压干燥—高温液化氧化炉”组合处置工艺，盐液采用连续出料装置，设备容量大，相对热散失量少，热效率高，适于大批量、高效率、连续生产。

## 4. 污染治理或环境修复效果

有机物去除率  $\geq 98\%$ ，对单一废盐，氯化钠、硫酸镁或硫酸钠资源化产品分别符合《工业盐》(GB/T 5462-2015)、《工业硫酸镁》(HG/T 2680-2009)、《工业无水硫酸钠》(GB/T 6009-2014)标准要求。对多种混合工业废盐，经处理后可作融

雪剂使用，产品符合国家相关标准要求。

## 5. 技术示范情况

该技术已在易科力（天津）环保科技有限公司 10 万 t/a 烷基化废酸资源化生产硫酸镁项目、中安信资环境建设投资有限公司菏泽鄆城化工园区 28 万 t/a 危废协同资源化处置项目、江苏杰林环保科技有限公司 5 万 t/a 工业废盐渣资源化项目及渤海宏铄（连云港）清洁技术有限公司、山东潍坊门捷化工有限公司等高盐有机废水及工业废盐资源化项目中应用，有机物去除率达 98% 以上，工业废盐经处理后生成氯化钠、硫酸镁、硫酸钠、融雪剂等资源化产品，可以达到各种工业盐的产品标准。

## 6. 技术成果转化推广前景

该技术成果的推广应用可有效解决化工生产过程中产生的大量废盐长期、超期暂存的现状，工业废盐的无害化、资源化处置可为企业降低运行成本，实现工业废盐资源化利用，还可以减少矿物开采，节约自然资源。

### （四十四）高浓度含盐有机废液悬浮焚烧及盐回收技术装备

#### 1. 技术名称

高浓度含盐有机废液悬浮焚烧及盐回收技术装备

#### 2. 适用范围

化工、炼油、造纸、印染等行业高浓度难降解含盐有机废液处理。

#### 3. 技术内容

### 3.1 技术原理

一体化悬浮焚烧高浓度含盐有机废液锅炉采用 U 型膜式壁锅炉结构，一侧为膜式壁敷设卫燃带的绝热燃烧室，另一侧为膜式壁炉墙围成的急冷室，急冷室内布置多组膜式壁管屏，绝热燃烧室与急冷室为膜式壁敷设卫燃带的烟气转向室，绝热燃烧室与烟气转向室构成焚烧炉膛，在转向室和急冷室之间设置向内部倾斜一定角度的遮烟墙，烟气转向室底部即为熔盐槽。熔盐槽底部中心部位设置一个熔盐溢流孔，确保液态熔盐排放顺畅。

在绝热燃烧室炉顶装设雾化喷枪，顶喷高浓度含盐有机废液。助燃辅助燃料燃烧器炉膛侧壁以四角切圆的形式布置于炉膛上部侧壁。助燃燃料通过燃烧器进入炉膛，并保持焚烧炉膛出口烟气温度 $\geq 1100^{\circ}\text{C}$ ，炉膛内烟气流速 $\leq 4.0\text{m/s}$ 、烟气停留时间 $\geq 2\text{s}$ 。焚烧炉膛出口  $1100^{\circ}\text{C}$  的高温烟气进入冷却室，在冷却室内快速降温至  $550^{\circ}\text{C}$ ，使熔融态的熔盐急剧冷却为固态的脆性盐。

### 3.2 主要创新点

(1) 采用了 U 型膜式壁结构，解决了高盐废液焚烧的难题。

(2) 创新了顶喷废液侧烧辅助燃料的悬浮燃烧技术，以适应高盐有机废液焚烧完全,有机物彻底焚毁。

(3) 采用了膜式壁炉墙及挂屏式受热面、遮烟墙等锅炉结构技术，以适应完全焚烧，以及热能回收、设备长期可靠运行的要求。

(4) 发明了液态排盐技术，确保回收有机碳含量近零的无机盐，实现资源化。

#### 4. 污染治理或环境修复效果

出口烟气  $\text{NO}_x$  浓度  $\leq 100\text{mg/m}^3$ ， $\text{SO}_2$  浓度  $\leq 50\text{mg/m}^3$ ，颗粒物浓度  $\leq 20\text{mg/m}^3$ ；回收的钠盐中 TOC 含量未检出，可直接资源化利用。每小时可回收约 1t 高纯度硫酸钠，锅炉产生约 35t  $2.2\text{MPa}$  饱和蒸汽。

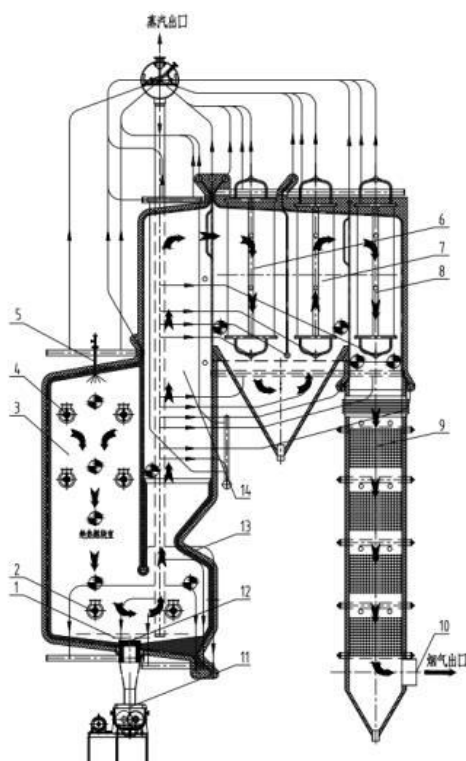


图 1 一体化悬浮焚烧处理高浓度含盐有机废液锅炉

1—熔盐池、2—补燃燃烧器、3—绝热燃烧室、4—辅助燃料燃烧器、5—雾化喷枪、6—第二冷却室、7—第三冷却室、8—第四冷却室、9—低温受热面、10—烟气出口、11—双轴冷却

器、12—熔盐溢流装置、13—遮烟墙、14—膜式壁管屏

## 5. 技术示范情况

江苏海力化工有限公司造纸行业己内酰胺高浓度化工含盐有机废液焚烧工程总处理量 600t/d，其中高盐有机废液处理量 480t/d，有机废气处理量 120m<sup>3</sup>/d。经处理后烟气主要污染物达到《危险废物焚烧污染控制标准》（GB 18484-2020）要求，回收钠盐中 TOC 含量未检出；无固废、液废产生。

## 6. 投资估算

以江苏海力化工有限公司造纸行业己内酰胺高浓度化工含盐有机废液焚烧工程（600t/d）为例，设备投资 4500 万元。

## 7. 投资回收期

以江苏海力化工有限公司造纸行业己内酰胺高浓度化工含盐有机废液焚烧工程（600t/d）为例，运行当年即可回收建设成本。

## 8. 技术成果转化推广前景

该技术可实现废物资源化利用，预计到 2025 年，该技术市场占有率近 1%，总投资规模 30 亿~60 亿元，应用前景广阔。

### （四十五）含油污泥热裂解技术及装备

#### 1. 技术名称

含油污泥热裂解技术及装备

#### 2. 适用范围

石油勘探、开采、炼制、清罐、储运及含油污水处理过程中产生的含油固体废物处理处置。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

含油污泥热裂解技术是指利用有机物的热不稳定性，将含油污泥在无氧或缺氧条件下高温加热，原油中的轻组分和水分受热蒸发，不能蒸发的原油重组分通过热分解转化为轻组分，再以气体形式蒸发出来，从而实现原油与泥砂的分离，获得裂解油、不凝可燃气和固体产物。

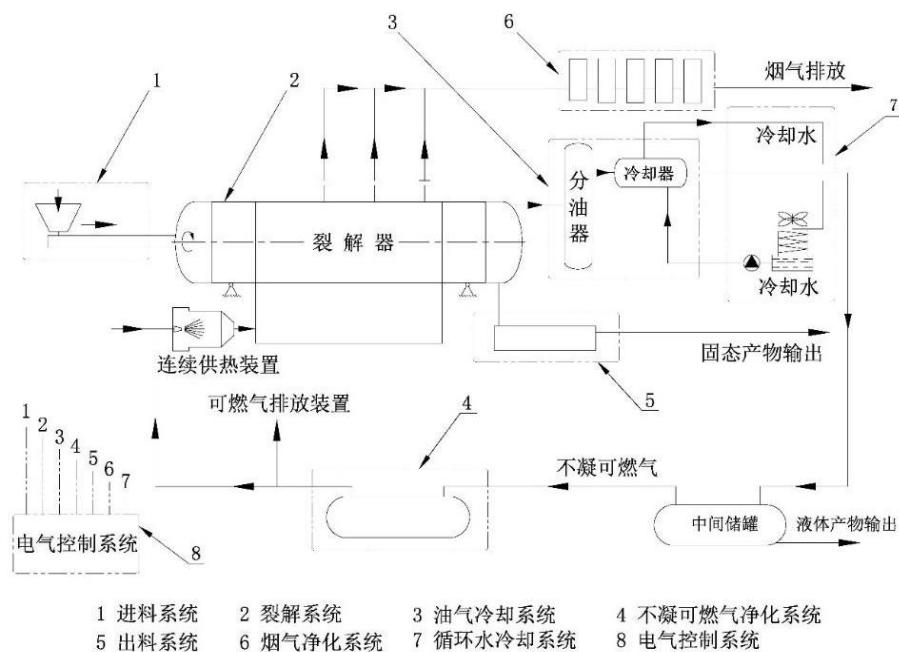


图 1 含油污泥热解工艺流程图

#### 3.2 主要创新点

（1）原材料包容性大，对原材料无需筛分（包含石块、木块、编织袋、防渗膜、手套、衣物、废弃包装物、容器、过滤吸附介质等粘油废弃物），简化工艺流程，大幅降低处理成本。

(2) 开发了无结焦、热分散技术，热效率高，物料裂解充分，产物品质高且稳定。

(3) 开发了组合式专有密封技术，实现了连续进出料下的稳定动态密封。

(4) 解决了裂解气相产物易聚合的问题，提高了油回收率，保证裂解装备的长期稳定运行。

#### 4. 污染治理或环境修复效果

热解处理后，固体含油率  $\leq 0.05\%$ ，VOCs 排放达到相关标准要求，二噁英  $\leq 0.1\text{ngTEQ/m}^3$ ，余热利用率  $> 90\%$ ，处理过程中不添加化学药剂。单套处理量  $30\text{t/d} \sim 300\text{t/d}$ ，工作时间  $\geq 8000\text{h/a}$ 。

#### 5. 技术示范情况

该技术及装备已在新疆克拉玛依油田应用，一期工程安装 32 台污油泥热解装备，综合处理能力 112 万  $\text{t/a}$ 。热解温度  $< 500^\circ\text{C}$ ，热解压力  $0 \sim 200\text{Pa}$ ，年均工作时间 8000h，余热利用率  $> 90\%$ ，采用 PLC/DCS 智能化控制与监测预警系统，生产线运行安全、可靠。

#### 6. 投资估算

以 10 万  $\text{t}$  含油污泥热裂解综合利用项目为例，设备投资约 5000 万元。

#### 7. 投资回收期

以 10 万  $\text{t}$  含油污泥热裂解综合利用项目为例，项目投资回

收期 3.22 年（包含项目建设期 1 年）。

## 8. 技术成果转化推广前景

含油污泥的有效处理是油田环境保护与可持续发展的重要方面之一，也是石化行业棘手的环保难题之一。利用裂解工艺与装备对污油泥进行处理，在绝氧/贫氧、常压、不添加任何化学药剂的条件下，有效回收原材料中绝大部分的含油组分，无二次污染产生，市场前景良好。

### （四十六）以热脱附为核心的含油污泥资源化及无害化处理技术

#### 1. 技术名称

以热脱附为核心的含油污泥资源化及无害化处理技术

#### 2. 适用范围

油气勘探过程中产生的油基泥浆及油基钻屑的处理；油田开采过程中产生的落地油泥、大罐底泥、水处理油泥等各类含油污泥的处理；炼油装置产生的各种含油污泥的处理。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 基本原理

该技术是专门针对石油石化含油污泥特点而开发的核心处理技术和全流程集成工艺技术。以热脱附技术为核心，在缺氧条件下使含油污泥中的石油类有机物从固体中脱附出来，然后通过冷凝回收油。配套分质分类预处理技术，形成全流程工艺，适应所有状态的含油污泥。处理后残渣的无害化水平仅次于焚

烧，同时实现了油的回收，避免了焚烧需要伴随燃料，以及产生的烟气和飞灰排放问题，排放量达到最低。

基于上述核心技术，分别形成了针对油田开采、油气钻探和炼油三大领域的含油污泥或泥浆的全流程解决方案。

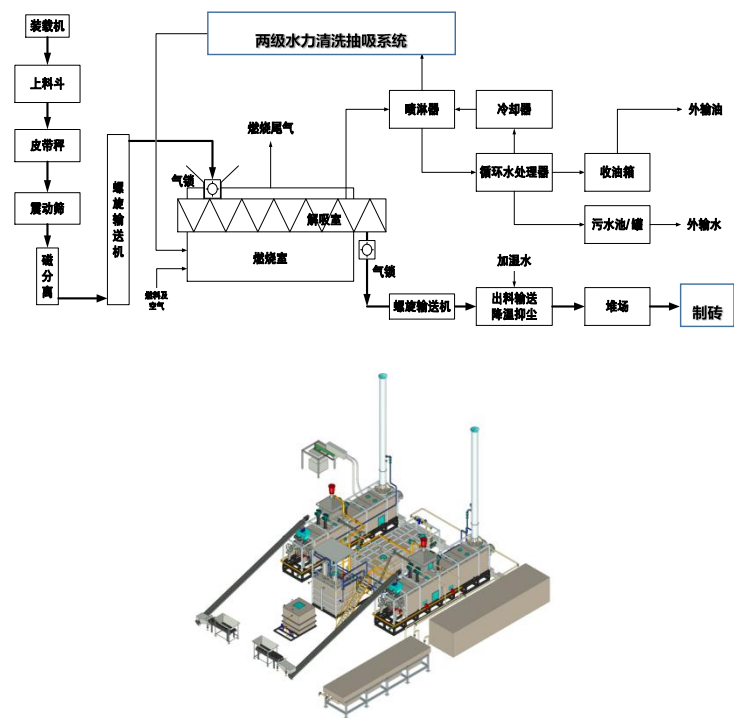


图 1 工艺路线及设备外形图

### 3.2 技术创新点

- (1) 该装置将含油污泥处理至干基含油量稳定小于 1%，并回收其中的油，同时实现了资源化和无害化。
- (2) 研发了新的自清洁进料和解吸室内部的防堵塞机械结构，使得整个机械设备能够长期稳定运行。

(3) 探索出了一整套的温度控制策略，可以稳定地将解吸温度控制在设定范围，既保障处理效果，又确保了系统安全。

(4) 研发了整套的运行控制程序，实现装置运行的程序化控制和自动的安全连锁控制，提高了运行稳定性和安全性。

#### 4. 污染治理或环境修复效果

以含水 30%、含油 10% 计算，处理每吨含油污泥，相对焚烧法，间接热脱附法减排二氧化碳 485kg，节约标煤 150kg。同时，热脱附法可以回收含油污泥中的油，每吨污泥回收油量 75kg，折合标煤 109kg。

#### 5. 技术示范情况

目前该技术已实现工程化推广应用，如镇原油污危废处理厂建设工程，新疆巴州含油污泥处理站，辽河油田曙光采油泥处理站。

2014 年在长庆油田进行的国内首台套工程应用，是国内第一座采用间接热解吸技术的示范工程项目，处理规模为 6000t/a。该项目通过了严格的安评和环评审批和验收，自 2014 年 10 月正式投产至今，除了冬季正常停产，一直连续稳定运行，处理后的出料稳定达到含油 1% 以下。

#### 6. 投资估算

以示范工程长庆油田第三采油厂含油污泥处理厂（6000t/a）为例，总投资 2626 万元，其中核心设备投资 608 万元，维护费用 30 万元，主体设备寿命为 10 年。

## 7. 投资回收期

投资回收期为 7.68 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

该技术的成功研发填补了国内在该领域的技术空白，摆脱了对国外的依赖，目前推广比例近 1%，有较大的推广前景。对促进我国石油石化行业对含油污泥无害化和资源化处理，实现国家的节能减排目标将提供有力的技术支撑。

### （四十七）工业废油蒸馏精制高值化利用技术

#### 1. 技术名称

工业废油蒸馏精制高值化利用技术

#### 2. 适用范围

现存废油回收再生企业的原料预处理及汽车修理点和企业设备更换的废润滑油处理。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

（1）以废润滑油为对象，建立废润滑油中稠环芳烃、卤代烃、甲苯不溶物、残留添加剂或金属有机物、老化副产物等的组成结构及其分布的测评方法，对废润滑油、蒸馏亚组分和精制产品进行系统分析，结合对废润滑油理化性质和污染程度、可加工性分析等，依据其资源化利用的技术经济潜质，构建评价废润滑油质量指标体系，建立危险废物属性和资源属性的评价指标体系，明确废润滑油、蒸馏亚组分和产品的危险废物属性和资源属

性，以及危险废物特征污染物在处置和利用过程中的迁移转化规律，形成工业废油处置和利用的技术经济性评估方法。

(2) 开发了新型催化剂配方和制备工艺，并建立了催化剂与渣油催化改质的构效关系，形成了相应的催化剂筛选方案，提出工业废油蒸馏渣油的催化改质及其资源化利用技术，实现对渣油的安全处置与高值化利用。

该技术在超高真空等极端条件下废油深度脱水除杂的处理能力高达 12000L/h，残余酸值低至 0.03mgKOH/g，残余水分低于 30mg/L；超短程分子蒸馏关键技术的有效分离温度比传统工艺降低了 130℃~220℃，可在 220℃左右运行；加氢脱硫率、脱氮率达到 95%以上。

工业废油蒸馏精制高值化利用工艺流程如图 1 所示。

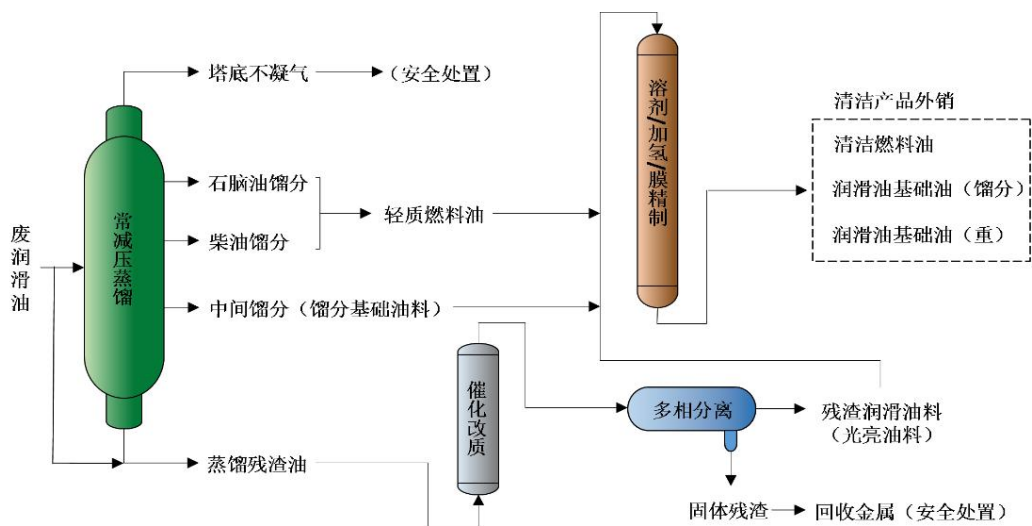


图 1 工业废油蒸馏精制高值化利用工艺流程

### 3.2 主要创新点

(1) 该技术在使用过程中并没有特定的条件限制，主要保证加氢精制过程中氢源的稳定供给，即能满足稳定运行。

(2) 对环境干扰敏感度相对较低，不受地域影响，可与化工生产工艺进行耦合，实现相关化工企业副产物氢气的高效利用，形成化工—废油再生联合生产，技术链条匹配合理。

(3) 实现了工业废油的全组分处置与高值化利用，工艺稳定，技术经济且环境友好。

### 4. 污染治理或环境修复效果

该技术可减少废油炼制的废气、废渣、废水排放，废油炼制基础油收率提高至 85%~90%。处理后油含盐量低于 3mg/L、油含水率低于 300mg/L，外排水含油量不超过 150μg/g。

### 5. 技术示范情况

重庆涂维环保科技有限公司万吨级废油全组分资源化关键技术项目，工程规模 3 万 t/a，该项目实现了将废油转化为高质量、不同类别的油品，极限真空度（残压值）仅 0.5Pa，工作真空度（残压值）600Pa，蒸馏温度 200℃，加氢精制压力 7.8MPa。经检测和测算，每处理 1t 废油可节约 20%~30%能耗。满足了大宗废油的资源化需求。

### 6. 投资估算

以 3 万 t/a 废润滑油再生高档基础油主体生产装置（包括预处理单元、加氢精制单元、后分馏单元）为例，总投资约 1500 万元。

## 7. 投资回收期

以 3 万 t/a 废润滑油再生高档基础油主体生产装置（包括预处理单元、加氢精制单元、后分馏单元）为例，静态投资回收期 0.396 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

该技术以环境保护和提高资源化率为出发点，推广工业废油处置与高值化利用技术，不仅可以每年处理 2 万 ~ 3 万 t 工业废油，还可产生 2 千万 ~ 3 千万元经济效益，有效促进了废油再生行业的节能减排，具有广阔的应用前景。

### （四十八）医疗废物高温干热处理技术

#### 1. 技术名称

医疗废物高温干热处理技术

#### 2. 适用范围

医疗废物消毒处理。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

医疗废物首先经过破碎碾磨装置碾碎，再将超高温导热油释放的热量通过消毒器内壁传送至碾碎的医疗废物上，最高温度可达 200℃；整个过程不加水或蒸汽，对破碎物料高温加热实现对医疗废物的灭菌消毒，干加热程序比蒸汽装置使用的温度更高，处理所需时间更短。

系统消毒温度 170℃ ~ 210℃，消毒时间 20min，搅拌速度 21r/min，消毒时消毒罐内部压力 4200Pa ~ 4600Pa。

### 3.2 主要创新点

(1) 控制系统采用自主研发的控制集成模块，设备集成度高，设备完全自动化、数字化运转，实现高效操作。

(2) 微生物杀灭对数值大于 6.00，微生物灭活效率大于 99.9999%，可彻底解决非焚烧技术存在的设备和运营成本高、排放二噁英等问题。

(3) 采用内部带有刮壁搅拌装置、出料推进装置的锥形夹套加热室作为主要灭菌设备，采用 PLC 智能化控制，保证医疗废物在加热室内受热均匀，加热温度控制在  $170^{\circ}\text{C} \sim 210^{\circ}\text{C}$  范围内。相比传统高温蒸煮工艺，提高了加热温度，缩短了加热时间，从而提高了灭菌效果和工作效率。

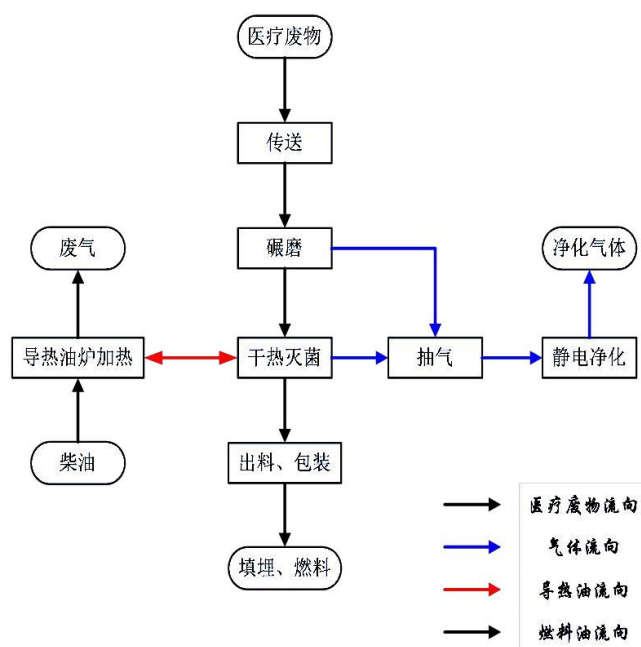


图 1 医疗废物高温干热处理工艺流程图

#### 4. 污染治理或环境修复效果

颗粒物、VOCs、氯化氢等指标浓度远低于医疗废物《医疗废物处理处置污染控制标准》(GB39707-2020)要求,消毒效果指示菌种的杀灭对数值 $>6.00$ 、氯气测定值均小于 $0.03\text{mg}/\text{m}^3$ 。处置过程不产生二噁英。

#### 5. 技术示范情况

哈尔滨市医疗废物处置中心项目处置能力 $70\text{t}/\text{d}$ ,高温干热工艺流程分为医疗废物处理系统、抽气+气体净化系统、加热系统及自控系统。该项目对繁殖体细菌、真菌、亲脂性/亲水性病毒、寄生虫和分枝杆菌以及枯草杆菌黑色变种芽孢等进行有效杀灭, $\text{PM}_{2.5}$ 、VOCs、臭气、颗粒物、氯化氢、氯气等污染物浓度均满足相应排放标准要求,汞及其化合物均未检出。

#### 6. 投资估算

以建设 $40\text{t}/\text{d}$ 的高温干热处理设备及附属设施为例,总投资10035万元,其中固定资产投资7002万元,设备购置费4604万元。

#### 7. 投资回收期

以建设 $40\text{t}/\text{d}$ 高温干热处理设备及附属生产及环保设施为例,投资回收期7.5年。

#### 8. 技术成果转化推广前景

该技术已在辽宁省、黑龙江省、江苏省、江西省、山西省等地运行,预计2025年企业产值将达到15亿元,市场占有率

近 30%，推广前景广阔。

#### （四十九）低阶煤浮选提质技术及设备

##### 1. 技术名称

低阶煤浮选提质技术及设备

##### 2. 适用范围

除褐煤外的低阶煤的浮选。

##### 3. 技术内容

###### 3.1 技术原理

对选煤厂生产中小于 0.5mm 的原生煤泥和次生煤泥进行分选，浮选机技术工艺流程包括浮选前准备、浮选过程和浮选后产品脱水与回收。目前国内选煤厂主要有 3 种典型浮选工艺：一次浮选工艺，指煤泥水进入单槽或多槽的一段浮选机内，经过多次循环分选，选出的精矿不再次分选；二次浮选工艺，指煤泥水进入单槽或多槽的两段浮选机内，一段浮选机选出的精矿进入二段浮选机进行浮选，得到最终精矿；三次浮选工艺，指煤泥水进入单槽或多槽的三段浮选机内，一段浮选机进行粗选，选出全部精矿，精矿进入二段浮选机进行精选，选出质量等级高的精矿产品，二段尾矿进入三段浮选机，三段浮选机选出质量等级低的精矿产品，尾矿与一段浮选机尾矿合在一起形成最终尾矿，此种浮选工艺形式可选出两种质量等级不同的精矿产品。浮选机最大矿浆处理量  $2242.23\text{m}^3/\text{h}$ ，充气速率  $0.81\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{min}) \sim 1.05\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{min})$ ，充气均匀系数  $82.64\% \sim 86.92\%$ ，

浮选工艺流程如图 1 所示。

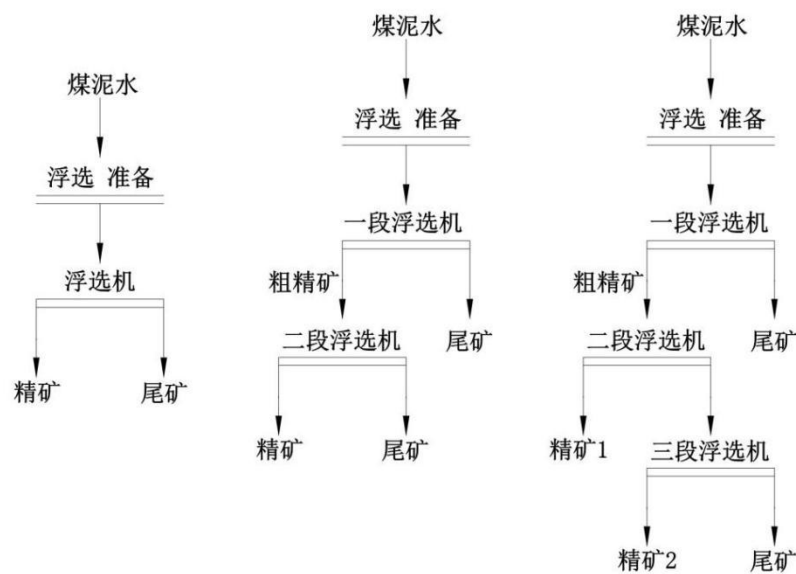


图 1 一次、二次和三次浮选工艺流程图

### 3.2 主要创新点

开发了首台 XJM-KS90 型浮选机，在山西中煤东坡煤业有限公司朔中选煤厂（1100 万 t/a）长焰煤（低阶煤）浮选，是世界首台用于千万吨级动力煤选煤厂的浮选设备，突破了低阶煤全粒级洗选提质的技术瓶颈。

### 4. 污染治理或环境修复效果

以山西中煤朔中项目为例，入料浓度在 20g/L ~ 70g/L、入料平均灰分 26.42%时，浮选后精煤平均灰分 14.16%，尾煤灰分 47.04%，精煤产率 62.64%，可燃体回收率 72.81%。

### 5. 技术示范情况

该技术成果已应用于山西中煤东坡煤业有限公司朔中选煤

厂和旬邑县中达燕家河煤矿有限公司选煤厂等 6 座选煤厂，取得了较好的经济效益和环境效益。

山西中煤东坡煤业有限公司朔中选煤厂浮选项目规模为 11Mt/a。采用直接浮选工艺，选用一台 XJM-KS90 型 4 室浮选机。浮选后煤泥灰分下降 10%以上，浮选后的精煤产品技术指标为：精煤粒度  $\leq 0.5\text{mm}$ ，空气干燥基（Ad） $14.0\pm 1.0\%$ ，产率  $>60\%$ ，使低值煤泥转化为优质商品煤。

## 6. 投资估算

以山西中煤东坡煤业有限公司朔中选煤厂浮选补套工程项目为例，工程建设总投资 1444 万元。

## 7. 投资回收期

以山西中煤东坡煤业有限公司朔中选煤厂浮选补套工程项目为例，固定资产投资回收期 1.32 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

该系列浮选机对煤泥可浮性适应能力强，且能实现低阶动力煤煤泥浮选，符合选煤工业发展趋势，可实现低阶煤浮选、清洁高效利用，对大型动力煤选煤厂煤泥浮选提质、提高资源利用效率、促进节能减排具有示范意义，市场前景广阔。

### （五十）细粒尾矿模袋法堆坝成套技术与应用

#### 1. 技术名称

细粒尾矿模袋法堆坝成套技术与应用

#### 2. 适用范围

细粒尾矿堆坝。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

通过建立模袋处理细粒尾矿的固砂透水—挤压排水固结—约束成型的强度增长机制，提升细粒尾矿坝整体稳定性，实现细粒尾矿安全筑坝。

尾矿浆进入模袋后通过模袋材料的有效孔隙将水透出而将尾砂阻挡于模袋内，达到固砂排水目的。在模袋外部荷载及灌浆压力共同作用下及时将自由水排出，模袋内尾砂由自由排水固结变为挤压排水固结，相较于传统堆坝方式，固结时间缩短为原来的 1/4。模袋自动充灌装备单台筑坝能力达到 1200m<sup>3</sup>/d。

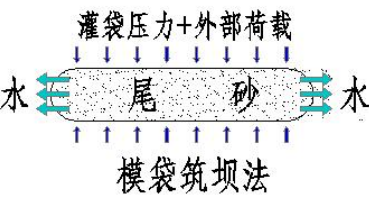


图 1 模袋固砂透水

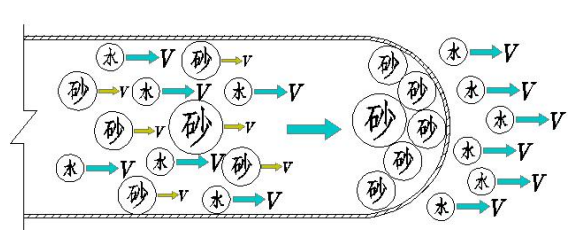


图 2 模袋加压排水固结

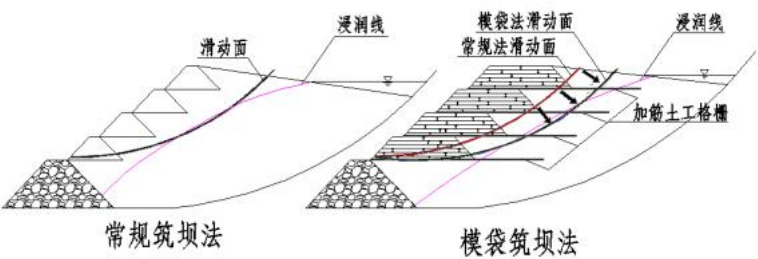


图 3 模袋法堆坝提高坝体稳定性示意图

### 3.2 主要创新点

(1) 创新了细粒尾矿模袋法堆坝成套技术，实现细粒尾矿的安全高效筑坝，拓宽了细粒尾矿堆坝粒径适用范围。

(2) 提出了模袋坝稳定性增强的作用机理及破坏模式。

(3) 建立了多因素耦合作用下的模袋法堆坝稳定性控制机理及工艺优化措施，在此基础上研发出适用于细粒尾砂模袋法堆坝的安全稳定性评价新方法。

(4) 研制了模袋法自动分级筑坝装备，优化了传统模袋法堆坝工艺。

### 4. 污染治理或环境修复效果

采用模袋体堆筑子坝方式使细粒尾矿由松散体变为模袋内的压实体，实测力学强度提高 10%以上。同时模袋子坝延长了坝外壳厚度，使得最危险滑动面向库内推移，坝体整体安全性提高 30%以上；充灌模袋的材料全部利用选矿厂排出的尾矿或添加药剂后的全尾矿，且充灌模袋过程中排出的细粒尾矿水经处理后回用。

### 5. 技术示范情况

云南思茅山水铜业有限公司大平掌尾矿库，矿山采选能力由原来 1500t/d 提高到 4000t/d。由于选矿厂生产能力增大及选矿工艺改变，导致入库尾矿量增大，尾矿平均粒度偏细，产生了库内沉积滩坡度小、滩长和安全超高难以控制、坝体安全性差等问题。采用模袋法尾矿堆坝为主的综合安全治理措施，技

术路线为：模袋铺放→分级（全）尾矿充灌→模袋的挤水固结→模袋体交错堆坝，实现尾矿固废安全环保堆存。模袋堆坝方量  $1000\text{m}^3 \sim 1200\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{套})$ ，充灌压力  $0.1\text{MPa} \sim 0.3\text{MPa}$ 。该尾矿库自 2014 年完工以来一直运行良好，目前已进行复垦。

## 6. 投资估算

模袋充灌设备投资约 100 万元，为设备材料采购及组装等直接费用。

## 7. 投资回收期

技术应用当年即可回收投资。

## 8. 技术成果转化推广前景

与传统上游法堆坝相比，细粒尾矿模袋法堆坝技术具有尾砂固结速度快、尾砂利用率高、施工工艺简单、场地适应性强、可边生产边堆坝等特点，可实现大规模堆坝，技术工艺应用成熟，可推广性强。预计到 2025 年，该技术将在西藏、新疆、甘肃、云南、黑龙江等省份推广应用。

## （五十一）熔融钢渣高效罐式有压热闷处理技术及装备

### 1. 技术名称

熔融钢渣高效罐式有压热闷处理技术及装备

### 2. 适用范围

钢铁厂钢渣处理。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

在密闭压力容器内，利用钢渣余热遇水产生的高温高压水蒸气使钢渣中的游离氧化钙快速消解，并使钢渣粉化。分为钢渣辊压破碎和余热有压热闷两个阶段，渣经由渣罐倾翻车倾入破碎床，同时进行辊压破碎和打水冷却，完成钢渣的破碎和降温，确保出渣温度控制在  $500^{\circ}\text{C} \sim 600^{\circ}\text{C}$ ，粒度小于  $300\text{mm}$ 。破碎降温后的钢渣倒运至热闷区的压力设备内，密闭后进行打水作业。液态水遇到高温钢渣变成水蒸气，从而产生  $0.2\text{MPa} \sim 0.4\text{MPa}$  压力，使钢渣中游离  $\text{CaO}$  快速消解，完成钢渣的稳定化处理，并使钢渣粉化。

第一阶段在  $30\text{min}$  内完成，钢渣由  $1600^{\circ}\text{C}$  冷却至  $600^{\circ}\text{C}$  以下，粒度破碎至  $300\text{mm}$  以下；第二阶段在  $2\text{h} \sim 3\text{h}$  内完成钢渣有压热闷，钢渣中游离  $\text{CaO}$  充分消解至含量  $< 3\%$ ，浸水膨胀率  $< 2\%$ 。钢渣尾渣含水率  $< 5\%$ ，吨钢渣可回收  $0.2\text{MPa}$  以上压力蒸气量不低于  $150\text{kg}$ 。



图 1 熔融钢渣高效罐式有压热闷处理生产线效果图

### 3.2 主要创新点

发明了熔融钢渣辊压破碎处理方法及装备；开发了钢渣有压热闷快速消解技术及装备；首次研究并揭示了钢渣有压热闷可燃气体产生和变化的规律，攻克了控制有压热闷引起爆炸的技术难题；开发了熔融钢渣高效罐式有压热闷处理技术与装备。

### 4. 污染治理或环境修复效果

可最大程度实现钢渣资源化，处理后钢渣 20mm 以下颗粒占比 > 70%；尾渣浸水膨胀率 < 2%；烟气中颗粒物浓度低于 10mg/m<sup>3</sup>。尾渣符合《用于水泥和混凝土中的钢渣粉》（GB/T 20491-2017）和《道路用钢渣》（GB/T 25824-2010）要求。

### 5. 技术示范情况

该技术已在 60 余家钢铁企业应用，形成钢渣年处理能力 4000 万 t，服务炼钢产能超过 3.4 亿 t。以首钢京唐炼钢连铸工程钢渣处理项目为例，处理规模 60 万 t/a，采用液态钢渣—渣罐倾翻—辊压破碎—渣罐转运—有压热闷工艺，钢渣辊压破碎处理后水渣比 0.25 ~ 0.35；余热有压热闷喷水总量为渣量 30% ~ 40%，入罐钢渣温度 500℃ ~ 600℃，热闷后钢渣尾渣含水率小于 5%。该项目将钢渣中金属铁最大程度地回收利用，品位 TFe ≥ 85% 的渣钢回收率约 8%，品位 TFe ≥ 35% 磁选精粉回收率约 15%，这部分含铁物料可实现厂内循环利用。破碎磁选后的钢渣经过粉磨后，可用作混凝土的掺合料。

### 6. 投资估算

以某钢厂新建 60 万 t/a 钢渣生产线为例，主体设备及附属设备投资约 1 亿元，建筑及安装工程投资约 1 亿元，工程总投资约 2 亿元，折合吨钢渣处理投资约 330 元。

#### 7. 投资回收期

以某钢厂新建 60 万 t/a 钢渣生产线为例，项目静态投资回收期约 3 年。

#### 8. 技术成果转化推广前景

该技术解决了熔融钢渣高效破碎、有压热闷、超净排放等技术难题，满足现代炼钢钢渣处理高效化、装备化、安全清洁化要求。我国规模钢铁企业超过 200 家，未来国内钢铁企业仍有近 1 亿 t 的钢渣处理工艺需要进行升级改造，该技术潜在市场规模超过 200 亿元，市场应用前景广阔。

### （五十二）废旧轮胎（橡胶）智能化裂解与炭黑深加工成套设备

#### 1. 技术名称

废旧轮胎（橡胶）智能化裂解与炭黑深加工成套设备

#### 2. 适用范围

废旧轮胎、高分子固体废物处理及循环利用。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

废旧轮胎裂解与炭黑深加工成套技术装备关键技术，包括废旧轮胎裂解技术和热解炭黑深加工成套设备技术。其原理是

在无氧或氮气条件下，将废旧轮胎高温裂解成裂解油、裂解气、裂解炭黑和钢丝，然后将裂解炭黑进行深加工，裂解炭黑依次经过贮存、磁选、超细研磨、混合、改性、造粒、烘干和包装等工艺流程，获得高附加值产品，可替代部分商业炭黑的环保型热解炭黑，实现了裂解炭黑产品的高值化循环利用。同时，炭黑输送采用智能化的密闭式气力传输系统，完全替代人工操作，解决了物料人工输送过程中的泄漏、误操作等不安全因素和二次污染等问题。

连续裂解生产线单机年处理废旧轮胎能力 $\geq 2$ 万 t，能耗 $\leq 75$ （kW·h）/t；热解炭黑深加工设备单机年处理能力 $\geq 7000$ t。裂解炭黑产品：细粉含量 $\leq 10\%$ ，加热减量 $\leq 2\%$ ，炭黑吸油值（DBP） $\geq 60\text{cm}^3/100\text{g}$ ，拉伸强度 $\geq 18.0\text{MPa}$ 。

工艺路线如图 1 所示：

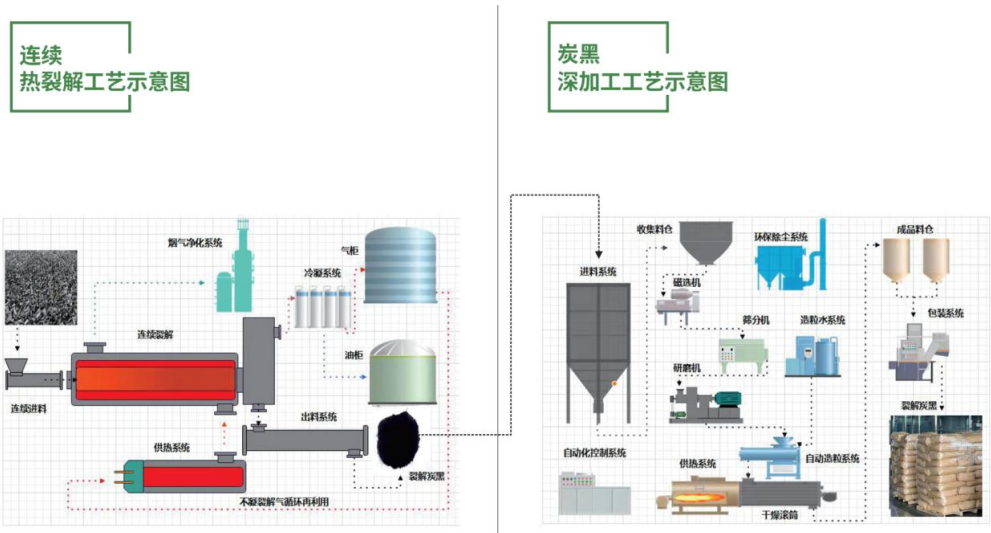


图 1 废旧轮胎裂解工艺路线图

### 3.2 主要创新点

(1) 废旧轮胎裂解技术：研发了废旧轮胎裂解智能化连续生产线，解决了进料、裂解、出渣过程的密封难题，实现了连续生产，效率提高 20% 以上；通过采用独创的 RCOS Plat 远程运维控制系统，具备智能检测、智能控制、数据智能采集、故障自诊断等特点，实现了智能化的废旧轮胎无害化综合利用，形成了人机互联、机机互联、统一协调的高效裂解装备与副产物梯级利用系统。

(2) 热裂解炭黑深加工技术：形成了智能化连续裂解与炭黑深加工技术成套工艺，集成开发了研磨、磁选、改性、湿法造粒等技术，有效改善裂解炭黑产品质量，获得高质量、高性能的环保炭黑，解决了裂解炭黑品质低、不能大范围应用于再生产等问题，可替代工业炭黑作为橡胶补强剂，提高产品有效收率，实现了废旧轮胎裂解炭黑高值化利用。

### 4. 污染治理或环境修复效果

每处理 1 万 t 废旧轮胎，生产炭黑、油和钢丝，可减少二氧化碳排放量 1.1 万 t。尾气排放达到《石油化学工业污染物排放标准》（GB 31571-2015）、《恶臭污染物排放标准》（GB 14554-1993）等要求。

### 5. 技术示范情况

该技术已在河南伊克斯达再生资源有限公司 10 万 t/年废旧橡胶绿色生态循环利用智能化工厂项目中应用，一期项目总投

资 3.3 亿元，占地面积约 200 亩，建筑面积约 7 万 m<sup>2</sup>。自 2019 年投入生产以来，生产经营稳定。

裂解炭黑作为主要产品之一，经深加工处理后品质有较大提升，增值 2500 ~ 3000 元/t，可替代部分商业炭黑，带动化工、橡胶工业等关联产业发展。

## 6. 投资估算

按年处理 10 万 t 废旧轮胎计算，项目总投资 29240 万元，其中工程建设投资 8570 万元，设备购置费 20670 万元。

## 7. 投资回收期

按年处理 10 万 t 废旧轮胎计算，静态投资回收期约 5.8 年（含税）。

## 8. 技术成果转化推广前景

按照 10 万 t/a 废旧轮胎循环利用计算，项目达产后约可生产 4.5 万 t 裂解油、3.5 万 t 裂解炭黑、1.2 万 t 钢丝。我国废旧轮胎年产生量约 1800 万 t，全球年产生量约 4500 万 t，该技术成果具有较好的市场推广潜力。

### （五十三）利用皮革固体废物生产皮革复鞣剂和填料技术

#### 1. 技术名称

利用皮革固体废物生产皮革复鞣剂和填料技术

#### 2. 适用范围

制革行业皮革固体废物资源化利用。

#### 3. 技术内容

### 3.1 技术原理

集成制革灰皮废肉渣资源化利用工艺、废毛制备蛋白填料技术、含铬皮革固体废物生产蛋白类复鞣填充剂和铬鞣剂技术，开发了配套集成设备，将制革生产过程中的皮革废碎料加工成胶原蛋白基填料和具有良好复鞣性能的含铬复鞣剂，回用于复鞣填充工序。相关技术的工艺流程分别如图 1、图 2、图 3 所示。

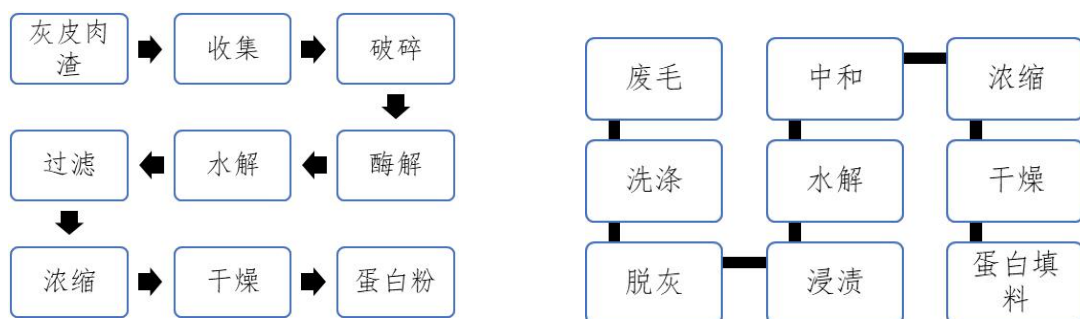


图1 制革灰皮废肉渣清洁化工艺流程

图2 利用废毛生产蛋白填料工艺流程

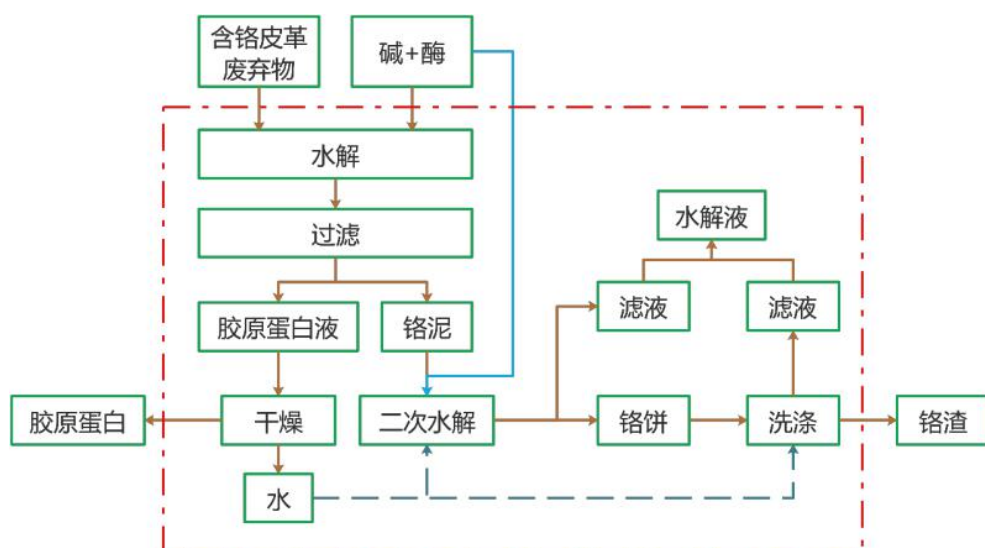


图3 循环法提取胶原蛋白技术工艺流程

### 3.2 主要创新点

(1) 利用循环法得到低铬、低灰分的胶原蛋白，同时降低了胶原蛋白的干燥成本。

(2) 采用多种方法对胶原蛋白改性，提高胶原蛋白类复鞣填充剂的填充性，改善皮革手感和染色性能，解决了纯蛋白材料复鞣填充效果差的问题。

(3) 含铬滤渣使用酸溶解并进一步改性，得到具有良好鞣制性能的含铬复鞣剂，克服了回收含铬复鞣剂对皮革产品质量的影响。

### 4. 污染治理或环境修复效果

可从含铬皮革废弃物中提取胶原蛋白，降低 20% 以上生产成本，胶原蛋白中的铬含量和灰分含量降低 30% 以上，改善了皮革手感和染色性能。制革废毛综合利用率达 90% 以上，含铬皮革废弃物综合利用率达 90% 以上。

### 5. 技术示范情况

该技术已在多家制革企业和固废处置企业推广应用。河北中皮东明环境科技有限公司废皮革综合利用项目，年处理 1 万 t 含铬废皮革固废，0.5 万 t 废毛，该项目利用废毛制备蛋白填料、蛋白基皮革复鞣填充剂和铬鞣剂，项目投运后每年可节约废弃物填埋成本 1000 万元，生产的铬鞣剂、蛋白填料和复鞣填充剂可实现年收入 2000 万元。

### 6. 投资估算

按年处理 1 万 t 皮革废弃物计算, 约需投入资金 3700 万元。其中设备投资 2500 万元, 土建投资 1210 万元。

#### 7. 投资回收期

按年处理 1 万 t 皮革废弃物计算, 静态投资回收期约 3 年。

#### 8. 技术成果转化推广前景

利用该成套设备生产的胶原蛋白基填料和含铬复鞣剂产品, 能够完全回用于皮革加工中的复鞣工序, 为企业节约处理含铬革屑的危废处理成本, 还节约复鞣工序的化工材料成本, 实现环境、经济和社会效益的有机统一。

### (五十四) 废旧三元锂电池元素定量补偿异位重构制备三元前驱体技术

#### 1. 技术名称

废旧三元锂电池元素定量补偿异位重构制备三元前驱体技术

#### 2. 适用范围

废旧三元锂电池及其材料回收与综合利用, 包括 3C 数码电池、动力与储能电池等, 以及废旧三元锂电池材料。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

针对废旧电池回收处理过程中电解液无序排放的问题, 采用自动拆解装置成套装备与工艺, 实现自动切割、自动分选电池极片。在自动拆解过程中, 采用真空引流—转轮吸附集中处理有机废物, 采用控温真空蒸馏技术回收退役三元锂电材料中的有机溶

剂，消除有机质对环境的污染，实现有机质的再生利用。

针对正极材料酸浸提锂的传统工艺存在酸消耗量大、伴随干扰金属多等问题，通过采用钠复合盐焙烧方法破坏三元材料的原有结构，使锂转化为可溶性锂盐，钴镍锰转化为难溶性的物质，再通过加水浸出从而实现锂与钴镍锰的分离。其原理示意图如图 1 所示。

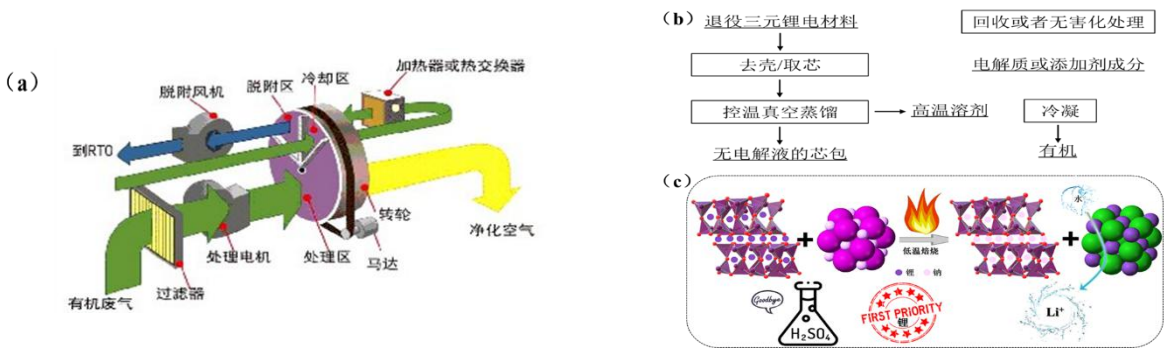


图 1 (a) 转轮吸附处理有机废气原理示意图；  
(b) 有机溶剂组分控温真空蒸馏回收技术工艺流程；  
(c) 钠复合盐焙烧—水浸提锂工艺原理示意图

3.2 主要创新点

(1) 创新采用“控温真空蒸馏—转轮冷凝回收”、新型萃取剂萃取优先提锂、选择性分步除杂、精准配料、三维立体浆式搅拌(搅拌频率  $40\pm 10\text{Hz}$ )、非恒定 pH 调控(pH 值 10.9 ~ 11.6)、三元素定量补偿异位重构等技术，实现短流程和高效绿色回收废旧三元锂电池。

(2) 开发了深度放电工艺与设备、自动拆解与分离、低温

焙烧等预处理设备与技术，解决了电池后续破碎处理过程中易起火、环境污染等问题；同时实现铜、铝和粉末有效分离及资源循环利用。

(3) 研发了自动拆解与极片处理装置。自动拆解装置由上料机构、输料机构、用于切割动力电池头部和尾部的切割机构、用于将电池从动力电池的外壳推出的分离机构、外壳推料机构和出料输送机构等组成，可实现动力电池自动拆解；极片处理装置由上料除铁平台、粗碎机、粉碎机、旋风集料器、中央除尘系统、振动筛分机及粉料仓组成，可实现电极活性物质与集流体自动分离。

#### 4. 污染治理或环境修复效果

以江西赣锋循环科技有限公司 34000t/a 废旧锂电池综合回收项目为例，与传统湿法工艺相比，锂回收率提高 10%以上，镍钴锰回收率提高 5%以上，硫酸用量减少 35%以上，SO<sub>2</sub> 减排 10%以上。

#### 5. 技术示范情况

江西赣锋循环科技有限公司 34000t/a 废旧锂电池综合回收项目工艺流程为：退役三元锂电池经深度物理放电、自动拆解与分离、低温焙烧等预处理得到三元正极粉料，再经浆化、还原酸浸、新型萃取剂萃取优先提锂、pH 精确调控沉淀除 Mg、硫化锰除 Zn、氟化物除钙镁等分步净化除杂得到镍钴锰净化液，最后采用萃取一反萃、三维立体浆式搅拌、非恒定 pH 调控、三

元定向补偿重构等技术制备三元前驱体材料。废水、废气经处理达标后排放，一般固体废物按照环境管理要求处置，危险废物交由有相关资质单位处置。运行 3 年，采用该技术成果已累计实现销售收入 13.27 亿元，实现利税 1.73 亿元。

## 6. 投资估算

按年产 12000t 三元前驱体材料生产线计算，设备投资 23328 万元。

## 7. 投资回收期

按生产线年产 12000t 三元前驱体和 4250t 电池级碳酸锂计算，税后投资回收期 2 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

据估算，2025 年，我国退役电池将累计高达 125GW·h，其中三元锂电池占比 50%以上，且年增长率高达 70%，该技术的市场应用前景广阔。

# （五十五）废旧荧光显示器与照明灯具回收拆解及稀土再生技术

## 1. 技术名称

废旧荧光显示器与照明灯具回收拆解及稀土再生技术

## 2. 适用范围

废旧荧光器件拆解处理、稀土冶炼及利用。

## 3. 技术内容

### 3.1 技术原理

以典型废旧荧光器件（废旧 CRT 显示器、液晶显示设备和荧光灯）为对象，开发了废旧荧光器件与照明灯具多品类、自动化、全密闭拆解技术及荧光粉回收装备，废弃荧光粉酸浸—过氧化钠碱溶—酸浸技术，稀土及有害组分快速分析检测技术；建立了流水线式稀土荧光粉的分离富集流程，形成回收、拆解、收集、检测、提取和再生利用技术体系。含汞荧光粉采用蒸馏法回收，产生的含汞废气采用集中吸附法处理达标后排放。

该技术可实现废旧荧光器件高效拆解，稀土综合浸出率  $\geq 99.5\%$ ，碱熔温度降至  $650^{\circ}\text{C}$ ，碱熔时间  $\leq 30\text{min}$ ，达到高纯度分选及高质量、低成本、低能耗控制。

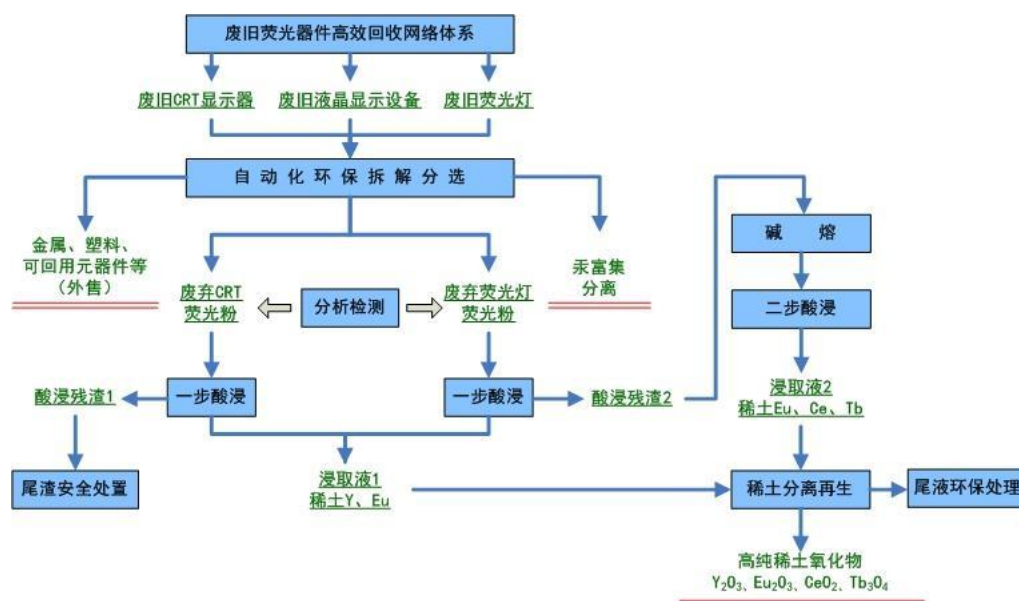


图 1 废旧荧光器件回收拆解—稀土再生技术路线图

### 3.2 主要创新点

(1)解析了废旧荧光器件回收系统的市场结构,构建了“互联网+分类回收”模式及物联网信息化平台,形成了典型城市矿产大数据系统,实现废旧荧光器件的高效回收和追溯管理。

(2)开发了废旧 CRT 显示器全自动、全密闭切割与荧光粉收集技术及装备,采用金刚石刀片环切技术实现 CRT 显示器管屏和管锥的自动化分离,建立荧光粉集尘装置及负压回收系统。

(3)开发了废旧液晶显示设备立体式拆解工装体系,实现单工位对废旧液晶显示设备全流程拆解,其中立体式机械运输占地空间小;拆解工位采用负压技术,实现粉尘、废气高效收集,避免污染因子扩散。

(4)开发了废旧荧光灯多品类、自动化、全密闭拆解技术及回收装备,采用激光切割+高压吹脱与破碎技术拆解,建立了流水线式稀土荧光粉的分离富集流程,采用吸附与蒸馏法综合处理回收汞。

(5)开发了废旧 CRT 显示器、液晶显示设备和荧光灯中荧光粉稀土氧化物总量、各稀土组分含量以及铅、镉、汞等元素含量分析检测技术,建立了废弃稀土荧光粉化学分析方法行业标准。

(6)开发了废弃 CRT 荧光粉“氧化酸浸”和废弃荧光灯荧光粉“酸浸—碱熔—酸浸”稀土提取技术、分离提纯与再生利用技术,实现了稀土的高效提取与再生,建立了典型废旧荧

光器件稀土回收处理技术要求系列行业技术规范。

#### 4. 污染治理或环境修复效果

以江西格林循环产业股份有限公司废弃荧光器件自动化拆解及废荧光灯管和荧光粉综合利用项目为例，可实现 24h 不间断运转，处理能力  $\geq 1100$  万支/a，汞回收率达 99%，荧光粉收集率达 99%，稀土综合浸出率  $\geq 99.5\%$ ，烟气中汞含量  $\leq 0.005\text{mg/m}^3$ 。

#### 5. 技术示范情况

江西格林循环产业股份有限公司废弃荧光器件自动化拆解及废荧光灯管和荧光粉综合利用项目，包括年处理废弃荧光器件 600 万台拆解生产线、年处理 3300t 废弃荧光灯管生产线。建立了多品类废旧稀土荧光灯一体化回收成套装备。通过全密闭、负压、多级分选、筛分和过滤等技术环节和技术操作，实现了废旧荧光灯的精确计数与全流程追溯，满足废弃稀土荧光粉自动高效回收的工艺要求，保证有价元素综合回收和利用。

#### 6. 投资估算

以建设年处理废弃荧光器件 600 万台拆解生产线、年处理 3300t 废弃荧光灯管生产线为例，设备投资 5104 万元。

#### 7. 投资回收期

以建设年处理废弃荧光器件 600 万台拆解生产线、年处理 3300t 废弃荧光灯管生产线为例，税后投资回收期（含建设期）5 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

我国每年报废的荧光灯已超过 18 亿只，在未来十年间仍将维持该数量。该技术可在我国百余家废弃电器电子产品拆解企业推广应用，具有较好的推广应用前景。

### （五十六）流态化焚烧炉资源化及无害化处理废旧印刷电路板技术

#### 1. 技术名称

流态化焚烧炉资源化及无害化处理废旧印刷电路板技术

#### 2. 适用范围

电子废弃物（废旧电路板、废电线、废电缆等各种含铜电子废弃物），含铜污泥、含铜废渣、废杂铜等含铜二次废料的资源化、无害化处理。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

破碎后的废旧电路板等电子废弃物加入流态化焚烧炉内，落在炉内高温熔池表面，在熔池的翻滚下迅速进入熔体之中。用喷枪将高压空气和燃料鼓入高温熔体中，加速了物料熔化和反应，鼓入熔池的气体给高温熔池输入了很大的搅拌功，使熔池激烈搅动，从而大大强化了气—液—固之间的传质传热过程。电路板中的有机物燃烧放出大量的热量，也直接给予熔体，减少了化石燃料消耗，提高了热能利用率。

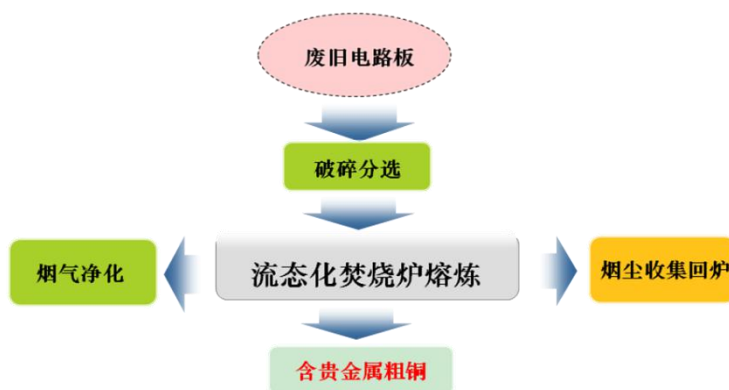


图 1 流态化焚烧炉资源化处理废旧印刷电路板技术工艺路线图

### 3.2 主要创新点

(1) 首次将流态化焚烧技术应用到废旧印刷电路板处理领域，开发了国内首个专用于处理废旧印刷电路板的熔池熔炼炉—流态化焚烧炉，实现了有价金属的综合回收，铜、金、银等有价金属回收率 > 95%。突破了国外技术封锁，使我国成为全球第五家掌握熔池熔炼炉处理电子废弃物技术的国家。

(2) 解决了传统火法处理废旧电路板时的烟气不达标难题，二噁英指标达到欧盟标准，安全环保。热利用率高，生产自热进行，化石燃料消耗少，温室气体排放量低。

### 4. 污染治理或环境修复效果

废旧印刷电路板生产粗铜国家尚无相应标准，参考《铜冶炼企业单位产品能源消耗限额》(GB 21248-2014) 中表 6 从粗、杂铜冶炼工艺生产粗铜所规定的能耗指标。该技术充分利用废旧印刷电路中有有机质实现自热，化石燃料消耗少，年最大消耗

化石燃料煤 0.26t，相比传统鼓风炉或反射炉处理消耗燃料煤减少了 0.58t，折合年减少标准煤耗 0.41tce/t 粗铜。以年处理 2 万吨电路板规模计，减少 CO<sub>2</sub> 排放 4076.66 t/a。

## 5. 技术示范情况

技术示范应用单位中节能（汕头）再生资源技术有限公司，位于广东省汕头市潮阳区贵屿镇贵屿循环经济产业园区华美片区。示范工程年处理废旧电路板 2 万 t，总投资 11302.14 万元。项目 2015 年年底建成，2016 年 3 月试产成功，2017 年 7 月实现连续生产，2018 年 7 月被中国有色金属工业协会组织鉴定整体技术达到国际领先水平。目前连续稳定生产，主要处理广东贵屿循环经济产业园区及周边地区的废旧印刷电路板。

运行效果及技术指标：项目产品粗铜品质（含 Cu > 90%）与嘉能可、优美科、阿鲁比斯等国际知名企业生产数据接近，铜回收率 > 95%，渣含铜 < 0.6%，烟气检测也达到国家排放标准。

## 6. 投资估算

以新建年处理 2 万 t 废旧电路板的工程规模计，该技术所需工艺设备投资 2687.17 万元，工程费用 4817.73 万元，设备技术寿命达到 15 年。

## 7. 投资回收期

以新建年处理 2 万 t 废旧电路板的工程规模计，项目投资回收期 4~5 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

该技术为联合国环境规划署推荐的废旧印刷电路板金属回收技术。前期已经过小试、中试和连续五年的生产实践验证，目前各项生产指标稳定、良好。该技术成熟可靠、先进环保，节能效果显著。随着国内电子产品的大面积普及，电子产品淘汰率也逐年提高。据统计，我国每年产生的废旧印刷电路板超过 100 万 t，还不包括其他电子废弃物，国内电子废弃物的产生量以年均 10% 的速度增长，未来市场容量较大，成果转化推广前景广阔。

#### 四、土壤和生态修复领域

（五十七）有机污染场地原位化学氧化和智能化控制修复技术

##### 1. 技术名称

有机污染场地原位化学氧化和智能化控制修复技术

##### 2. 适用范围

含氯代有机物、多环芳烃、石油烃等有机污染场地土壤和地下水原位修复。

##### 3. 技术内容

###### 3.1 技术原理

该技术采用搅拌或高压旋喷等方式，根据污染物浓度梯度分批次、分种类向土壤或地下水的污染区域添加缓释、高效的氧化药剂，最终达到氧化降解效果。针对一般（超过《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 36600-2018）标准筛选值 0~2 倍）有机污染土壤和地下水，使用自主研发的碱活化过

硫基药剂；针对超高浓度（超过 GB 36600-2018 标准筛选值 2 倍以上）有机污染土壤和地下水，使用小分子有机酸和螯合剂（EDTA-2Na）改良的 Fenton 试剂和活化过硫酸盐药剂进行复配修复，利用活化释放的自由基，形成双氧化系统增强氧化能力，降解有机污染物。在修复施工过程中，利用水环境中多源混合噪声监测参数进行模拟计算，获取最优工艺运行条件，在将土壤或地下水中污染物转化为无毒或相对毒性较小物质的同时，实现了修复过程与工艺的智能化控制。该技术药剂使用量可减少 15%，部分含氯有机物降解率可提高 20%。有机污染场地原位化学氧化和智能化控制修复技术工艺路线如图 1 所示。

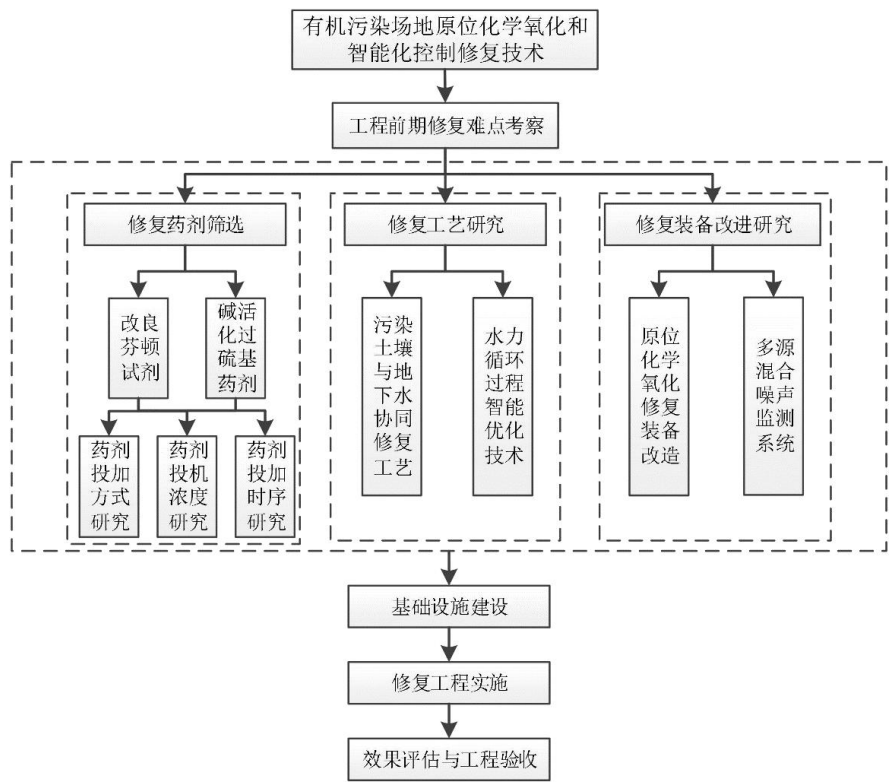


图 1 有机污染场地原位化学氧化和智能化控制修复技术工艺路线图

### 3.2 主要创新点

(1) 研制了具有高滞留特性的强氧化修复药剂，通过多自由基团组成双氧化系统增强氧化性能，并以小分子有机酸、螯合剂提升药剂滞留性能，扩展了药剂 pH 适用范围，提高氧化降解效率。

(2) 发明了原位和异位化学氧化修复装备，通过“精准注入—迁移缓释—强化氧化—抽出处理”过程及水力循环周期性运行方式，实现精准修复。

(3) 构建了混噪驱动下有机污染物降解动力学模型，揭示了多源混合噪声对有机污染物在水环境中降解过程的影响机制，发明了基于风险—成本两级管控的水力循环过程优化技术，实现动态精准控制。

### 4. 污染治理或环境修复效果

修复后土壤和地下水中有有机污染物浓度达到 GB 36600-2018 筛选值、《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017) III 类水质限值或场地修复目标值，相关污染物初始浓度在 5mg/kg ~ 5000mg/kg 时，去除率 70% ~ 90%。

### 5. 技术示范情况

该技术已在 25 个项目中应用，总计修复土方量约 37.3 万 m<sup>3</sup>，修复地下水方量约 4.3 万 m<sup>3</sup>。其中天津西青区高泰路地块土壤修复工程，有机污染土壤修复面积 11017.1m<sup>2</sup>，修复深度可达 5m，修复土壤量 34964.5m<sup>3</sup>，土壤修复因子主要为 TPH 脂肪烃 C6-C8、

C8-C10 及芳香烃 C8-C10；地下水修复面积 10139m<sup>2</sup>，修复量 35486.5m<sup>3</sup>，地下水修复因子主要为 TPH 脂肪烃 C8-C10、C10-C12 及 C12-C16，修复对象为浅层地下水。修复后土壤、地下水均满足国家标准要求。抽出的地下水经处理满足天津市《污水综合排放标准》（DB12/356-2018）三级标准后，排入当地市政排水管网。

## 6. 投资估算

以天津西青区高泰路地块土壤修复工程为例，总投资 4308.61 万元，其中固定资产投资 191.35 万元。

## 7. 投资回收期

以天津西青区高泰路地块土壤修复工程为例，项目静态投资回收期 3.26 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

近年来，我国对位于市区范围内的工业企业全面实施“退城进园”战略，现在约 90%的农药等生产企业已搬迁或正在搬至工业园区，遗留数量庞大的有机污染场地待修复后再利用。该技术成果不仅解决了含农药、氯代有机物、苯系物及石油烃等污染场地修复治理的难题，而且对于焦化、染料、医药、石油化工等行业的污染场地修复具有推广应用价值。

（五十八）复杂污染场地高压旋喷注射—原位化学氧化成套修复技术

### 1. 技术名称

复杂污染场地高压旋喷注射—原位化学氧化成套修复技术

## 2. 适用范围

低一中渗透性地层，如淤泥质粉质黏土、粉质黏土、粉土、粉—细砂等；苯系物、氯代烃、硝基氯苯、苯胺、多环芳烃、石油烃类有机污染场地。

## 3. 技术内容

### 3.1 技术原理

将带有特殊喷嘴的注浆管（钻杆）通过钻孔送至土层预定深度，然后从喷嘴喷出预先配制的复配氧化/还原药剂、压缩空气，注浆管在喷射的同时自下而上旋转提升，高压液流和气流对土体进行切割搅拌，使修复药剂与污染土壤和地下水充分混合。所采用“二重管法”高压注射工艺具有劈裂和渗透扩散作用，通过药剂在土壤或含水层中的迁移、扩散和反应，将污染物分解为低毒或无毒产物。高压旋喷注射—原位化学氧化技术路线如图 1 所示。

药剂注射压力 20MPa ~ 30MPa，药剂注射流量 20L/min ~ 120L/min，空气注射压力 0.3MPa ~ 0.8MPa，扩散半径 0.8m ~ 3.5m，最大修复深度 12m ~ 25m。

### 3.2 主要创新点

（1）采用气、液二重管高压注射工艺，注射压力大，注射修复药剂液流过程辅助高压空气流的作用使修复药剂在土壤和地下水环境中的扩散效果明显提升，扩散半径显著增加。

（2）应用地层范围可扩展至低中渗透性地层（如粉质粘土、粉土、淤泥质粘土、黏土层），适用于单独土壤污染、土壤和地下

水复合污染（饱和层）、单独地下水污染等情形，提升了最大注浆量，解决了原位注入过程中的返浆问题，大幅提高了注射效率。

（3）采用定深度注射修复，解决了搅拌技术扰动上部非污染部位、造成二次污染严重及破坏地基承载力的问题，解决了夹心层土壤和地下水修复难题，使土壤在施工后保持原有承载力，对于砂层土壤及地下水修复经济优势显著。

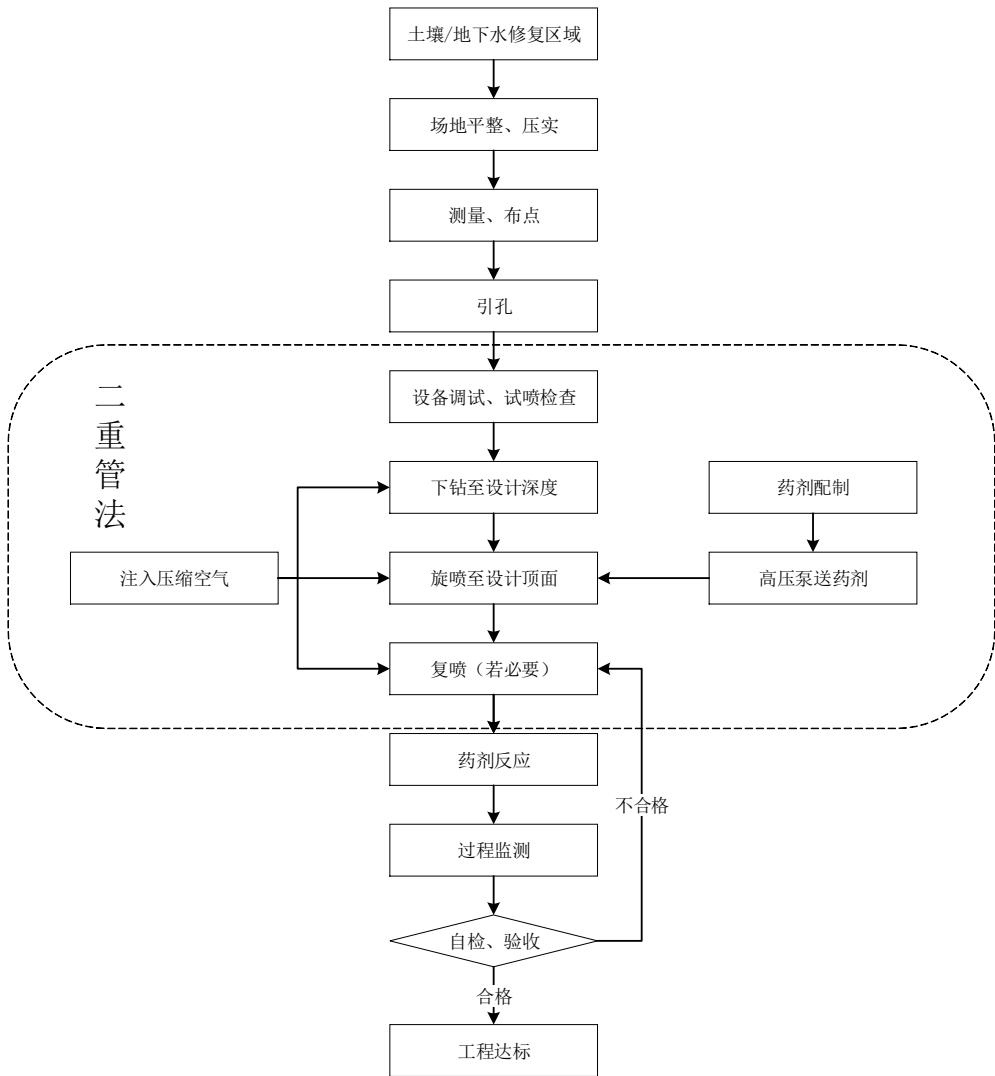


图 1 高压旋喷注射—原位化学氧化技术路线

#### 4. 污染治理或环境修复效果

以原湖北某染料厂生产场地重金属复合污染土壤修复治理工程项目为例，主要污染物为氯苯、1,2-二氯苯、苯、四氯化碳、二甲苯、萘、苯并（a）蒽、苯胺，修复前污染物浓度为10mg/kg~1000mg/kg时，修复后均达到修复目标要求，污染物去除率95%~99%。产生的尾气、污水经处理后达标排放。

#### 5. 技术示范情况

该技术已在湖北某染料厂生产场地重金属复合污染土壤修复治理工程、小南化地块土壤修复工程和合作村原煤制气厂二期土壤修复及地下水治理工程中应用。湖北某染料厂生产场地重金属复合污染土壤修复治理工程项目，总污染土壤修复量37.02万m<sup>3</sup>，其中单一重金属污染土壤13.27万m<sup>3</sup>，单一有机污染土壤21.30万m<sup>3</sup>，重金属、有机复合污染土壤2.45万m<sup>3</sup>。修复完成后，氯苯、1,2-二氯苯、苯、四氯化碳、二甲苯、萘、苯并（a）蒽、苯胺等有机物去除率95%~99%。

#### 6. 投资估算

以原湖北某染料厂生产场地重金属复合污染土壤修复治理工程项目为例，总投资约15000万元，其中设备投资1040万元。

#### 7. 投资回收期

根据污染场地治理修复工期以及地块流转时间确定，一般为1~3年。

#### 8. 技术成果转化推广前景

该技术适用于绝大多数有机污染土壤及地下水修复，具有地层适应性广、土壤和地下水协同修复、适用污染物广谱等优势，市场推广应用前景良好。

### （五十九）焦化类污染场地土壤风险评估技术

#### 1. 技术名称

焦化类污染场地土壤风险评估技术

#### 2. 适用范围

焦化类污染场地土壤风险评估。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

针对焦化类污染场地管理缺乏科学合理的风险评估方法导致过度修复等问题，在系统研究实际场地中典型污染物赋存形态与归趋行为等客观规律的基础上，创建了“污染物迁移转化—精细化调查评估”核心技术体系。针对挥发性有机污染物，创建了土壤气调查监测技术，开发了耦合土壤气中污染物浓度传输反应过程的呼吸暴露健康风险量化模型与层次化评估方法。针对重金属和半挥发性有机物，开发了模拟人体胃肠液消化过程的人体可给性测试技术，开发了以土壤中污染物可给性浓度作为暴露浓度的层次化健康风险评估方法。此外，针对以上模型与方法中众多参数取值的变异性及不确定性，建立了基于蒙特卡罗随机取样的概率风险评估方法。

工艺流程为：应用基于物理、化学和生物技术等多手段组合的焦化类污染场地精细化方法开展场地污染状况调查；采用基于人体胃肠液的体外模拟和温和化学解吸的生物可给性测定方法，测定污染物经口摄入情景下的人体可给性，通过建设土壤气监测井，实测土壤气浓度和剖面分布特征。在此基础上，利用土壤 VOCs 多相分配—传输—反应的耦合模型、建筑物再利用风险评估模型和基于模型参数不确定性的概率风险预测模型开展精细化风险评估。

### 3.2 主要创新点

（1）明晰了焦化类场地土壤、地下水和建筑物表面污染特征，阐明了多环芳烃在土壤及胡敏素中的吸附解吸动力学特性，发现苯系物在不同土质中的界面分配规律并改进多相分配模型的预测效果，证明了苯系物在包气带迁移过程中存在生物降解机制、深层土壤多环芳烃缺氧生物降解潜力，开发了基于界面分配与传输理论的土壤 VOCs 源衰减模型。

（2）建立了基于物理、化学和生物技术等多手段组合的焦化类污染场地精细化监测方法，研发了系列精细化风险评估方法。

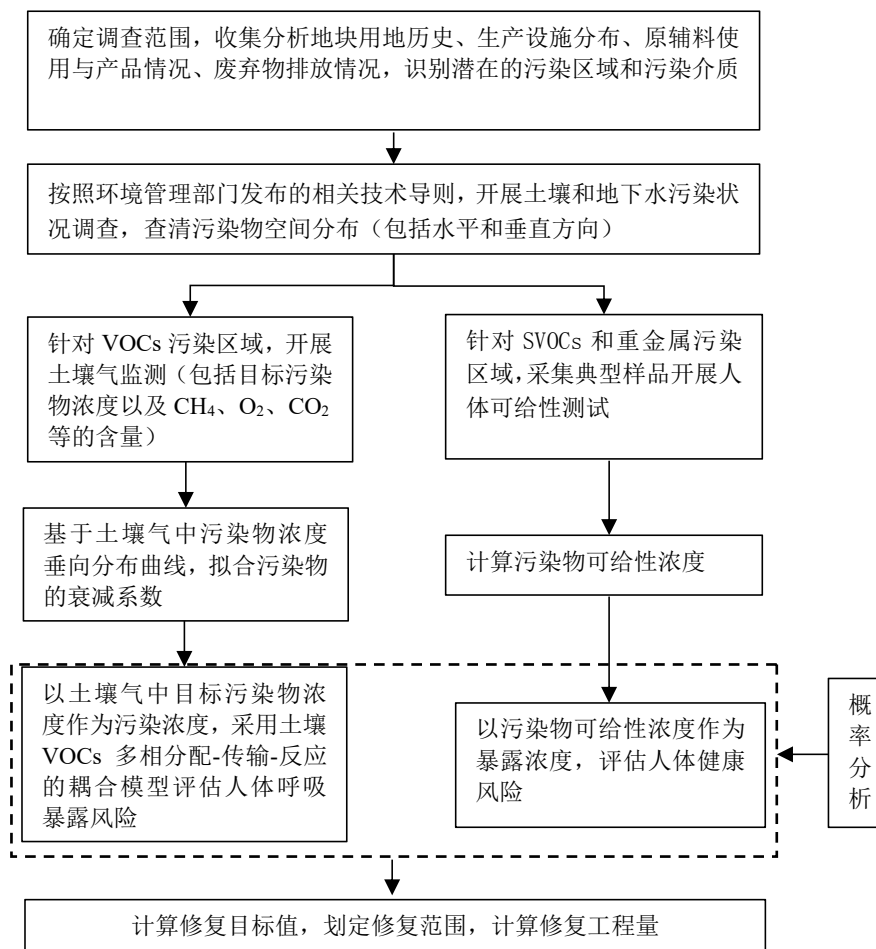


图 1 焦化类污染场地风险评估工艺路线图

#### 4. 污染治理或环境修复效果

采用精细化风险评估方法，可将 VOCs 类污染物风险评估的准确度提升 1~2 个数量级，重金属和半挥发性有机物风险评估的准确性提升 2~5 倍，降低风险 1~2 个数量级，节约 30% 以上修复量，成本较同类技术降低 50% 以上。

#### 5. 技术示范情况

该技术已在首钢主厂区原址、北京东方化工厂原址等国内

40 余个大型复杂污染场地应用，通过精细化场地风险评估避免场地过度修复，累积节约资金近 50 亿元。以首钢主厂区原址的工程项目为例，场地面积约 560 万  $\text{m}^2$ ，多环芳烃是土壤主要污染物之一，采用传统风险评估方法确定修复目标值 0.55mg/kg，对应污染土方量约 270 万  $\text{m}^3$ ；通过精细识别场地中风险关键驱动污染物苯并[a]芘在土壤中的赋存形态及其经口摄入后在人体胃肠液中的释放规律发现，该场地土壤中苯并（a）芘“老化”“锁定”现象显著，通过该项目开发的形态归趋与有效暴露剂量分析方法，最终确定此污染物的修复目标值 2.75mg/kg，减少修复土方量约 110 万  $\text{m}^3$ 。

## 6. 投资估算

设备投资约 14 万元，包括 2 套土壤气采样装备，1 套人体可给性测试装置。

## 7. 投资回收期

每套投资回收期 1 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

据不完全调查，我国目前存在 30 万块待修复污染场地，该技术推广应用前景广阔。

### （六十）多种重金属污染土壤同步固化—稳定化修复技术

#### 1. 技术名称

多种重金属污染土壤同步固化—稳定化修复技术

#### 2. 适用范围

含重金属污染场地土壤修复。

3. 技术内容

3.1 技术原理

（1）发现了重金属污染土壤修复常温固相反应规律，提出了重金属污染土壤硅铝基材料同步修复的作用机理，开发了“临界粒径—低碱激发—常温制备”的固废基环境材料绿色制备新技术。

（2）针对重金属阳离子污染、阴离子污染及阴阳离子多重污染场地开发了高性能环境修复材料，固结体中的重金属钝化率达到 95%以上。

（3）研发了特细固废“射流搅拌强化传质”技术和泥浆固液射流搅拌成套装备，修复材料用量降低 30%；开发了重金属离子晶格钝化的常温化学固化技术，土壤压实度达到 95%，综合施工成本较传统技术降低 30%，实现了重金属污染场地安全利用。

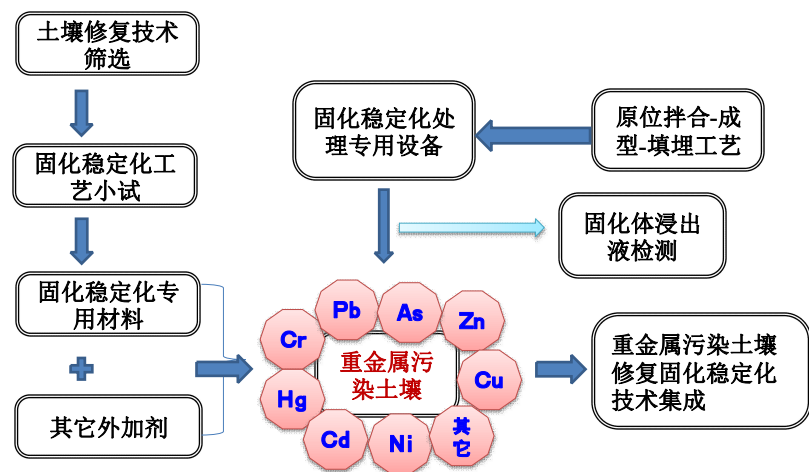


图 1 多种重金属污染土壤同步固化—稳定化修复技术示意图

### 3.2 主要创新点

(1) 开发了土壤固化剂，与现有技术相比，修复后土壤浸出毒性降低 1 个数量级，增容比降低 30%，长期稳定性更优，与国际最先进的重金属稳定化技术水平相当。

(2) 靶向修复材料与应用装备实现了国产化，修复成本较国外同类产品降低 40%。

### 4. 污染治理或环境修复效果

固结体浸出浓度低于 GB 3838-2002 中 IV 类水体限值，修复后土壤浸出液中  $\text{Cr}^{6+}$  浓度  $<0.05\text{mg/L}$ ， $\text{As}^{3+}$  浓度  $<0.1\text{mg/L}$ ， $\text{Pb}^{2+}$  浓度  $<0.05\text{mg/L}$ ， $\text{Cd}^{2+}$  浓度  $<0.005\text{mg/L}$ ， $\text{Hg}^{2+}$  浓度  $<0.001\text{mg/L}$ ，修复效果具有长期稳定性。

### 5. 技术示范情况

该技术已在武汉原染料厂、大庆石化总厂化工废料填埋场、宜昌田田化工场地、蒙古国乌兰巴托贮灰场等 60 余项工程中应用，实现了 1 万亩土地的安全利用，同步实现污染场地的无害化与资源化。

武汉 CBD 原染料厂污染土壤修复治理工程，修复土壤 38 万  $\text{m}^3$ ，该项目场地存在重金属、有机物以及复合污染，重金属污染面积为  $27261\text{m}^2$ ，重金属污染土壤总量为 26.45 万  $\text{m}^3$ 。经固化稳定处理的重金属污染土壤经第三方检测，确认浸出浓度达到修复目标值。

### 6. 投资估算

以年产 100 万 t 的重金属污染土壤靶向修复材料生产基地为例，设备投资约 5000 万元。

### 7. 投资回收期

以年产 100 万 t 的重金属污染土壤靶向修复材料生产基地为例，项目投资回收期 1 年。

### 8. 技术成果转化推广前景

全国土壤污染面积达 100 万 km<sup>2</sup>，其中 70% 为重金属污染。该技术突破了污染土壤修复材料与关键装备等瓶颈，建立了重金属污染土壤靶向修复的理论和体系，并实现了产业化应用，具有良好的推广前景。

## （六十一）高频声波振动钻进取样装备及技术

### 1. 技术名称

高频声波振动钻进取样装备及技术

### 2. 适用范围

污染场地非卵石层取样、岩土工程勘察、浅层矿产勘查。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

声频（或称声波，下同）振动钻进技术原理如图 1 所示，高速液压马达驱动一对偏心轴反向旋转，横向力相互抵消，向下则产生周期性激振力，当振动与钻具自然谐振频率叠合时，系统产生共振，具有最大钻进能量。

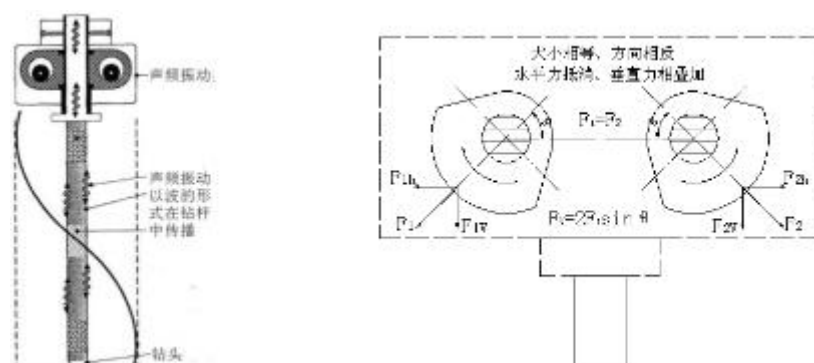


图 1 声频振动钻机工作原理

技术路线为：采用高频动力头提供振动力，将钻具贯入地层，不用泥浆，可连续快速钻取地表至特定深度的原状样品；配合使用套管或螺旋中空管钻进，可采集地下水样或建造地下水监测井；配合使用污染物监测仪器和特质电缆，可在线采集不同位置的污染物浓度并传输至地面；配合使用注浆泵和注浆管，可将修复药剂注入至目标层位。配合使用脱落锥，可完成物探爆破孔的施工。

钻机振动频率 50Hz ~ 180Hz，液压系统工作压力 21MPa，振动力 140kN，给进行程 > 3.0m，给进力 > 32kN，提升力 > 64kN，最大扭矩 > 1800N·m，最大转速 > 250r/min。

### 3.2 主要创新点

(1) 声频振动钻进时不使用冲洗液，可在干旱无水环境及松散软地层钻探使用，对样品和环境无污染，可获得连续、弱扰动柱状样品。

(2) 钻具不回转或仅做极低速旋转以防松扣，使旋转摩擦阻尼大幅减小，节省动力输出；高频振动钻进（50Hz ~ 200Hz）避开了土层固有频率（ $< 30\text{Hz}$ ），使钻具周围土粒完全液化，钻进阻力小，钻进速度大幅提高，尤其适合于砂层等松散地层取样，克服了常规低频振动和旋转取样导致样品易散落的缺点。

#### 4. 污染治理或环境修复效果

钻进过程中不使用泥浆、泡沫等介质，对样品和环境无污染，最大取样直径 130mm，钻孔深度可达 50m 以上，优于直推式取样钻机。

#### 5. 技术示范情况

该技术在复杂地层的无污染、弱扰动取样效果显著，已有 6 个工程项目应用。以山西尾矿坝闭库勘察工程为例，勘察完成 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>赤泥库坝顶及黄土坝体 859 平台 22 个勘探钻孔，其中孔径 115mm 的单孔最大钻深 44m，累计进尺 600 多米，获取了 300 多组原状土样。取样质量高，对土体扰动小，不需泥浆，钻进速度较常规 SH30 钻机快 1 倍，钻孔深度大。

#### 6. 投资估算

单台设备投资约 75 万元。

#### 7. 投资回收期

设备静态投资回收期约 1 年。

#### 8. 技术成果转化推广前景

该技术取样质量高，在土壤污染场地调查、治理与修复、高等级工程勘察、水溶性矿物勘探、浅层地源热泵孔和物探爆破孔等方面具有良好的市场前景。此外，目前国外进口 50m 声波钻机的价格约 300 万元，国内通过进一步优化研发及批量生产，成本可控制在 50 万 ~ 75 万元，售后服务费用也显著降低。预估该类钻机的年需求量约 200 台，市场前景良好。

## （六十二）重金属污染土壤芦竹修复及生态板材制造技术

### 1. 技术名称

重金属污染土壤芦竹修复及生态板材制造技术

### 2. 适用范围

重金属污染土壤修复。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

植物修复技术是利用植物吸收、固定、挥发、降解的机理去除或分解转化污染物质，使土壤系统的功能得到恢复或改善，属于一种低成本、非破坏型的原位污染土壤修复与土壤资源保护方式。为了促进植物修复技术的实用化，采用生长快、生物量大的芦竹对污染土壤进行修复，并对收获后的植物进行资源化利用，让污染土地的所有者在修复期间也可以继续获得良好的收益，修复模式如图 1 所示。

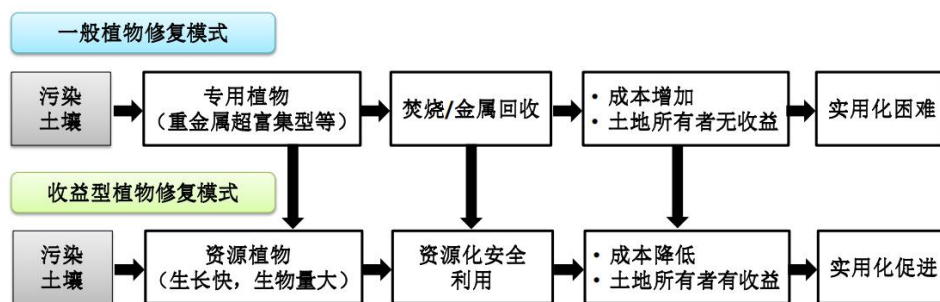


图 1 一般植物修复与收益型植物修复模式比较

芦竹生物产量高、全生育期无明显病虫害，不仅可用作重金属污染土壤修复植物，还是恢复荒地植被和防沙固土的先锋植物，具有重要的生态价值。该技术采用芦竹修复重金属污染土壤，并以富集重金属后的芦竹秸秆为原料，根据其组分特点，采用不含甲醛的改性异氰酸酯（MDI）作为胶黏剂，将秸秆纤维形成牢固的整体，制成人造板材。

### 3.2 主要创新点

（1）利用土壤修复后的秸秆制人造板技术提供了重金属污染土壤修复后植物资源化安全利用的一条技术路线，既能解决我国污染土壤绿色可持续修复问题，又能解决人造板原料短缺问题，实现植物修复产业链闭环。

（2）采用真空纤维分离技术，剥离植物茎秆的“强力韧性纤维”，结合完全不含甲醛的 MDI 生态黏合剂加工而成，制成的板材比一般板材更加坚固。

## 4. 污染治理或环境修复效果

以贵州铜仁汞矿区重度污染土壤（Hg 平均含量

21.44±19.94mg/kg)修复项目为例,种植的芦竹亩产量约 4t(干重)/a,植株 Hg 含量和积累总量分别为 4.46±1.40mg/kg 和 11.63 ~ 18.47g/亩。制成的秸秆人造板中汞含量 17.01±0.82mg/kg,符合《室内装饰装修材料木家具中有害物质限量》(GB 18584-2001)对可溶性汞≤60mg/kg 的限值要求。

## 5. 技术示范情况

该技术已完成了 2 个不同地区、不同汞污染程度的农田土壤修复示范工程。通过田间应用示范,芦竹作为汞污染土壤修复植物,可适应不同区域、气候和土壤类型,且对不同汞污染程度的土壤均有较好修复效果。修复后收获的芦竹秸秆制人造板,实现重金属污染农田“边修复边利用”的收益型植物修复模式。

铜仁市万山区中华山村汞含量为 8.61mg/kg ~ 36.10mg/kg 的污染农田,种植的芦竹植株中汞平均含量 4.46±1.40mg/kg,芦竹亩产量约 4t(干重)/a,每年可从土壤中提取重金属 Hg 高达 11.63 ~ 18.47g/亩,同时还伴随吸收重金属 Cd、Cr、As、Pb,对单一或复合重金属污染的土壤均有良好的修复效果。修复后芦竹茎秆生产人造板,其密度、静曲强度、弹性模量、板边握钉力、板面握钉力、2h 吸水膨胀率等性能指标均达到 P2 型刨花板的指标要求。

## 6. 投资估算

以投资建设一个年产秸秆板 25 万 m<sup>3</sup> 规模的项目为例,总

投资约 61070 万元。

### 7. 投资回收期

以投资建设一个年产秸秆板 25 万  $\text{m}^3$  规模的项目为例，投资回收期 4 年（税后，不含建设期）。

### 8. 技术成果转化推广前景

按人造板行业每年以 18.57% 的速度增长计算，到 2025 年，人造板生产规模有望突破 3 亿  $\text{m}^3$ 。我国矿区污染土壤面积大，亟需实施生态修复工程，具有很好的推广前景。同时，我国天然林全面禁伐以来，人造板工业面临严重的木材原料短缺问题，以修复后植物秸秆替代木材的秸秆板市场前景广阔。

## （六十三）黄土高原沟壑防控组合土障技术

### 1. 技术名称

黄土高原沟壑防控组合土障技术

### 2. 适用范围

坡度较小（低于  $25^\circ$ ）的黄土高原沟壑区、风蚀水蚀交错区、复合沟壑区、水土流失区固土集水保肥。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

基于分流、疏导、减缓、阻隔、固土、集流、保水原则的土基组合土障（组合堤坝），采用“梯田—草灌封顶、坑穴边坡绿化、组合土障（堤坝）锁口”技术，沟壑区水土流失完全停止。技术核心为组合土障（堤坝）技术，具体如图 1、图 2 所示。

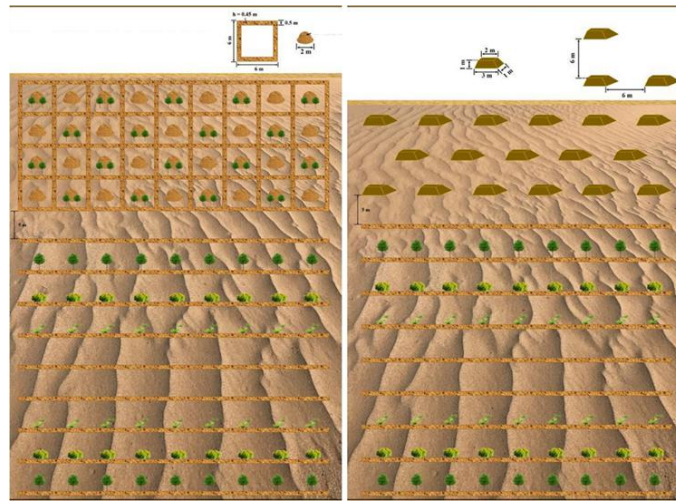


图 1 左：土网格—土堆—土行带—灌丛—草组合施工示意图；  
右：梯形土障（堤坝）—土行带—灌丛—草组合施工示意图

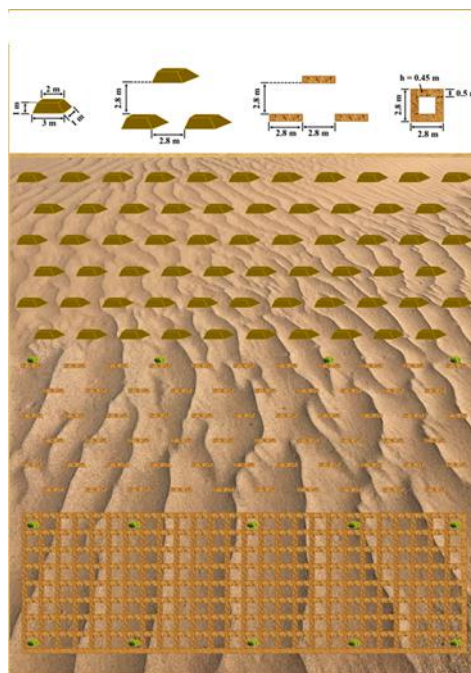


图 2 梯形土障（堤坝）—土行带—土网格—灌丛组合施工示意图

### 3.2 主要创新点

(1) 开发了防水蚀材料，可将水蚀率降低 1000 倍以上。

(2) 开发了工程—生物组合沟壑封顶技术、沟壑锁扣技术、沟壑边坡绿化技术、疏导分流功能土障与网格状阻隔功能土障组合技术、季节性洪水集聚利用技术。

(3) 利用土为基本原料，通过土障（堤坝）组合工程措施、工程—生物组合措施，短时间内实现了疏导、分流、减缓、阻隔、固定、集水及固土，风沙危害得到控制，水土流失完全停止，复合沟壑得到治理，治理区生态得到恢复。

### 4. 污染治理或环境修复效果

在甘肃省环县甜水镇国家沙化土地封禁区应用三年后，流沙完全固定，植物种类增加 31 种，植被覆盖度由 0 增加至平均 35%，最高覆盖度达 60%。地表 pH 向中性过渡，治理后地表 1cm 有机质、全氮、全磷、碱解氮及有效磷分别为原沙的 4 倍、3 倍、2 倍、2.6 倍和 2.6 倍。

### 5. 技术示范情况

该技术应用于甘肃省环县甜水镇沙化土地封禁保护区项目，采用自然生态恢复和科学治理相结合的方式实施，沟壑区水土流失完全停止，至 2020 年推广至 30.9 万亩。

### 6. 投资估算

采用该技术进行新建工程所需的主要设备装载机可租赁使用。单台装载机可日均完成 30 亩防控工程。每亩工程投入

700 ~ 1000 元。

## 7. 技术成果转化推广前景

黄土高原地区水土流失面积达  $4.54 \times 10^5 \text{km}^2$ ，年侵蚀模数大于  $15000 \text{t/km}^2$  的剧烈水蚀面积为  $3.67 \times 10^4 \text{km}^2$ ，治理需求迫切。该技术操作简单，机械化程度高，材料环境友好，成本低，治理效果好，推广前景广阔。

### （六十四）新型高聚物生态护坡技术

#### 1. 技术名称

新型高聚物生态护坡技术

#### 2. 适用范围

地质环境脆弱区生态修复，包括地质灾害体、工程建设创面及荒漠化、石漠化等生态修复。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理与内容

基于生态学、系统学与工程学等理论，采用“工程结构—生态材料—生物技术”多手段联合的方法，实现受损生态系统的恢复或重建。该技术由以下几方面组成：地质环境脆弱区生态修复材料、修复区植生层重构工艺、高陡工程创面生态修复施工机具装备、乡土植物筛选与繁育、生态修复工程智能管护。生态加固材料表观粘度  $16 \text{MPa} \cdot \text{s} \sim 17 \text{MPa} \cdot \text{s}$ ， $\text{pH} 7.0 \sim 7.5$ 。

工艺技术路线如图 1 所示。

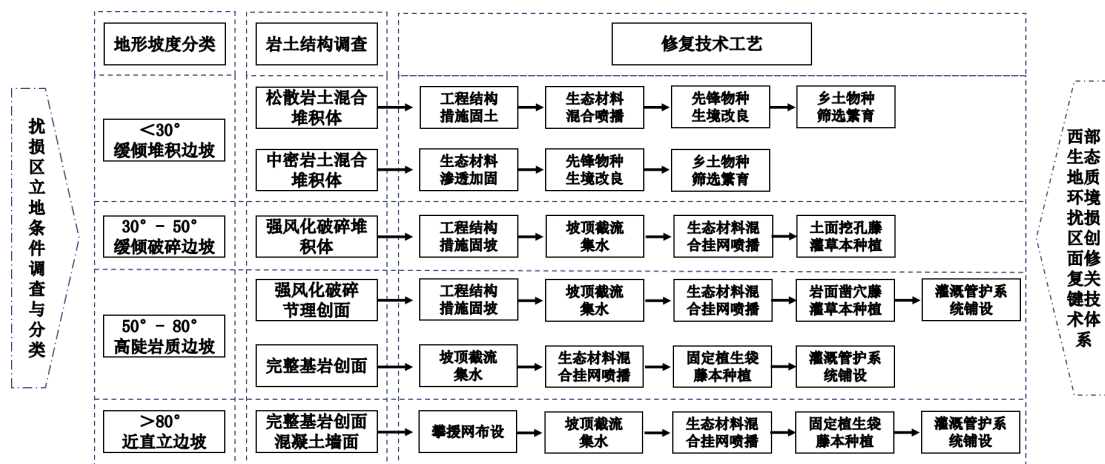


图 1 新型高聚物生态护坡工艺技术路线

### 3.2 主要创新点

(1) 研发了生态环境脆弱区固土结皮、土壤熟化、保水减蒸系列生态修复材料，解决了土壤稳固与水肥保持不可兼顾的技术难题。

(2) 构建了“结构补强—生态加固—基质改良—群落构建”生态修复工艺技术，解决了地质环境脆弱区陡立边坡生态修复技术难题。

## 4. 污染治理或环境修复效果

使用的材料皆为绿色环保产品，新型土壤加固材料在高寒、冻融等恶劣环境条件下也可保证植被长期稳定存活。该材料微量元素、重金属含量等均不超过国家标准要求。修复初期可恢复植被覆盖率至 80% 以上，后期逐渐实现自维持与长期有效固坡。

## 5. 技术示范情况

该技术已在青海黄南州边坡生态修复工程（海拔 2755m）、青海木里煤矿生态修复项目（海拔 3825m）、墨竹工卡巨龙矿区生态修复工程（海拔 4200m）等 20 余项不同海拔生态脆弱区修复工程中示范应用，均取得了良好的示范效果。

该项目对九寨沟景区 89 处地质灾害隐患点、可视范围内 24 处治理工程的 64 段挡墙立面及其周边裸露边坡实施绿化修复工程，总面积 62127m<sup>2</sup>。针对九寨沟“8·8”地震扰损区生态恢复问题，联合工程—材料—生物多手段修复方法，采用新型高聚物生态护坡材料进行植生层土壤重构，结合九寨沟乡土植物筛选与繁育，实现了土壤结构强度与植物生长水分养分控制性供给，解决了陡立地质创面长效性修复及地质灾害生态化治理的难题，促进受损生态系统恢复与正向演替，效果良好。

## 6. 投资估算

以九寨沟国家级自然保护区管理局九寨沟景区 89 处地质灾害隐患点治理工程绿化美化修复项目为例，项目总投资 6605 万元。

## 7. 技术成果转化推广前景

该技术可对地质环境安全和生态环境质量起到显著的改善作用，具有施工方便、经济环保和可持续发展的优势。该技术在 新疆天山公路边坡、西藏拉萨河谷边坡、九寨沟震损区陡立创面、雅江梯级水电开发建设创面修复等项目应用后，生态修

复效果良好，推广前景广阔。

## （六十五）砂（砾）质海岸线生态修复工程设计关键技术

### 1. 技术名称

砂（砾）质海岸线生态修复工程设计关键技术

### 2. 适用范围

砂（砾）质海岸线生态修复。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

砂（砾）质海岸线生态修复旨在恢复受损岸线自然属性和提高海域生态价值，是海岸带综合整治修复的重要内容。砂（砾）质海岸线生态修复以海滩养护为主要手段，辅以维持其稳定性和使用寿命的其他措施（如生态型构筑物修建、沙丘覆植种植）。其技术原理为：通过对工程选址的本底情况进行详实的基础调查，掌握砂（砾）质海岸线的本底数据；提出工程选址的沙滩剖面及平面的具体设计内容；综合海岸线的本底情况及设计内容开展海滩寿命及稳定性等相关模拟分析，进行修复设计方案比选，并对设计方案进行优化，得出合理且满足工程施工要求的设计方案；完成工程施工后，通过后期监测及跟踪监测，评估工程实施效果，进一步提出定期养护方案。技术路线见图 1。

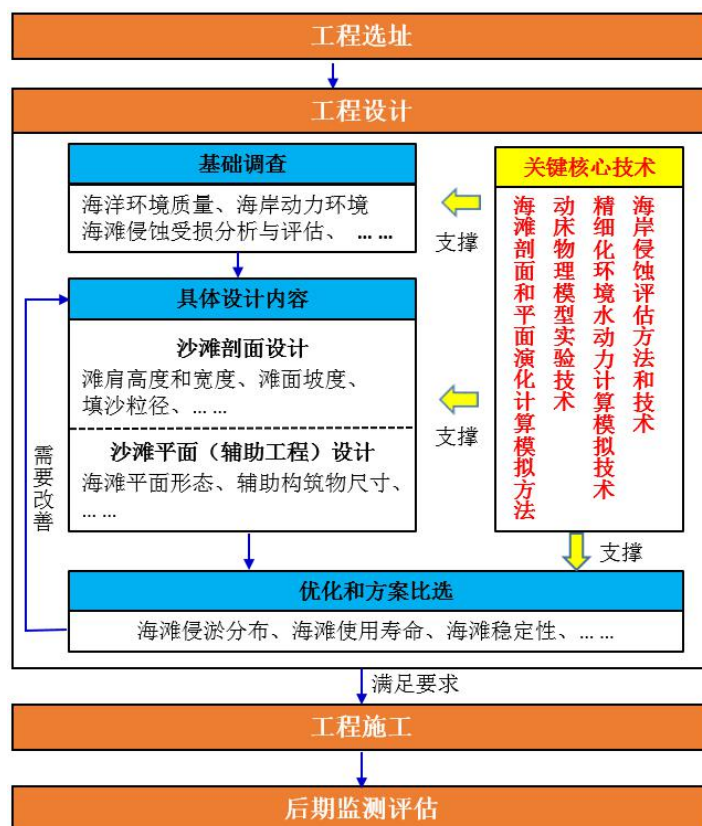


图 1 海滩演化的计算模拟技术路线

### 3.2 主要创新点

#### （1）建立了砂（砾）质海岸侵蚀评估方法和技术

海岸侵蚀评估方法和技术规定了海岸侵蚀监测与灾害调查的内容与主要方法，给出了海岸侵蚀灾害强度评价、风险评价、灾害损失评估体系，以及相关资料及成果整理的技术要求。

#### （2）研发了高效的海岸水动力环境（潮流、波浪）计算模拟系统

系统可用于数学模型和物理模型实验设计波浪推算；波浪

爬高计算，确定构筑物和滩肩高程等；工程前后波浪场变化（工程剖面和平布置的优化和选取）。

### （3）提出了砂（砾）质海岸动床物理模型试验新技术

针对传统方式的动床模型制作方法精度不高、效率低和实验后海滩高程测量精度不足、效率极低的问题，提出了一种砂（砾）质海岸动床物理模型实验方法，主要包括动床模型的快速制作装置和方法、大范围试验地形的三维高精度快速测量分析技术。

### （4）发展了砂（砾）质海滩剖面和平演化的计算模拟方法

海滩演化的计算模拟是砂（砾）质岸线生态修复工程设计的关键核心技术，主要包括剖面、岸线和平面计算，改进和拓展后的模型计算近岸波浪、波生流场以及岸滩演化更加合理精确，更适用于砂（砾）质海岸生态修复工程计算。

## 4. 污染治理或环境修复效果

以营口鲅鱼圈月亮湾综合整治与修复工程项目为例，治理前由于围海养殖破坏了宝贵的沙滩，海岸侵蚀严重，局部海岸年侵蚀后退速率  $0.8\text{m/a}$ 。工程实施后，恢复砂质岸线长度  $4.5\text{km}$ ，滩肩宽度不小于  $50\text{m}$ ，滩肩高程不低于  $2.5\text{m}$ ；新建海滩防护人工岬角工程  $500\text{m}$ ，礁盘区抛石防护工程  $250\text{m}$ ，海滩稳定性明显增强，区域生态环境得到改善，亲水空间得到拓展。

## 5. 技术示范情况

该技术已成功用于 3 个国家级海洋生态修复工程项目，如营口鲅鱼圈月亮湾综合整治修复工程、营口鲅鱼圈珍珠湾生态修复工程和大连市凌水湾综合整治修复项目等，累计指导修复砂砾质岸线 5.77km。

营口鲅鱼圈珍珠湾生态修复工程（渤海综合治理攻坚战生态修复项目），工程规模：修复自然岸线 1350m，其中砂质岸线 930m、基岩岸线 420m；堤坝拆除 2.2km，清除围海养殖池内淤泥及附属物 34.46 万  $\text{m}^3$ ，恢复滨海湿地 53 公顷，修复滨海湿地 82 公顷；750m 生态海堤建设。修复后自然岸线恢复至原始形态，岸线景观得到较大提升，同时岸线前沿水质环境得到改善，湿地修复后近岸无养殖池梗遮挡，整体海域视觉形态较开阔，改善了区域海洋生态景观，提升了海洋生态价值。

## 6. 投资估算

以投资 5000 万元以内的大中型砂（砾）质岸滩修复工程为例，一次设备投入约 100 万元，主要为购置调查、物模及数模实验所需的测量及实验设备，技术寿命 10 年以上。

## 7. 技术成果转化推广前景

该技术已在多项海洋生态环境领域国家重大工程项目应用，取得了良好成效，技术成熟度高。随着砂（砾）质海岸生态修复和其他相关“涉海”领域的需求不断增长，具有较好的推广价值。

## （六十六）水电工程边坡植生水泥土生境构筑技术

### 1. 技术名称

水电工程边坡植生水泥土生境构筑技术

### 2. 适用范围

水电、交通、采矿等工程建设产生的坡度不大于  $60^\circ$  的土质、岩质、土石混合及人工硬化边坡的生态修复。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

针对生态修复植生基材中水泥添加导致的微生物水平低、后续肥力持续性低、生态功能易退化等问题，研发了生态功能提升关键技术。针对生态修复植生基材在冻融循环作用下强度降低、边坡承接自然降雨量有限、灌溉水利用系数低等问题，研发了结构性能优化关键技术。针对生态修复工程喷射施工安全隐患高、材料浪费等问题，研发了施工效益提升关键技术。针对生态修复工程完成后植物自然演替生长和景观性较差的问题，研发了植被持续生长关键技术。

生境基材强度大于  $0.38\text{MPa}$ ，暴雨（ $80\text{mm/h}$ ）条件下侵蚀模数小于  $100\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ，整体稳定性提高 22% 以上，根系生长空间增加 10%，微生物多样性指数达 2.79 以上，植被覆盖率达 95% 以上。配套植被混凝土生态防护技术，可满足所有类型边坡生态恢复。

技术实施的工艺路线如图 1 所示。为提升施工效益，研发

并推出了两种植生水泥土专用设备，包括摇臂式一体化植生水泥土喷射机和湿喷混合法植生水泥土喷播作业系统，满足不同施工现场需求。

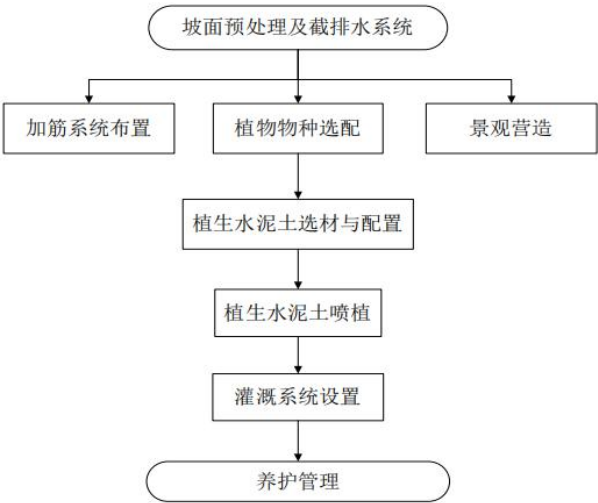


图 1 水电工程边坡植生水泥土生境构筑工艺流程图

3.2 主要创新点

（1）通过提升养分的利用效率，掺入包膜缓释复合肥和微生物菌剂，有效改善基材理化性质、生物特性，活化基材，提升生态系统功能。

（2）基材固液气三相结构合理，抗水蚀性强，抗冻强度耐久性得到增强；智能化灌溉覆盖率、均匀度与水源利用程度高，既节省了边坡生态修复工程的管养劳动量与耗水量，又兼顾维持边坡植被体稳定。

（3）开发了植生水泥土专用设备，作业效率高，喷射效果

好，操控灵活方便，可以满足不同施工现场的需求；采取的防飞溅措施可使全坡面喷射基材厚度均匀一致，有效减少基材喷植过程中的飞溅现象。

（4）通过将植生棒、植生穴等手段融入生态修复体系中，既能对坡面起到修复作用，又能营造优美景观，景观持续性强，养护费用低。

#### 4. 污染治理或环境修复效果

植生水泥土孔隙度处于 37%~48% 良好比例，酶活性提高 0.7~2.1 倍，有益微生物量提高 5~8 倍，速效养分固持能力提高 15%~25%，植被覆盖率达 95% 以上。可有效解决施工扰动带来的植被破坏和水土流失问题，明显改善边坡生态恢复效果，调节局部小气候。

#### 5. 技术示范情况

该技术已应用于水利、交通、采矿、市政等领域的 100 多个边坡防护与生态修复项目，应用总面积近 600 万  $\text{m}^2$ 。深圳鹏城实验室边坡修复项目已完成所有坡面植生水泥土喷播，实施总面积约 11200 $\text{m}^2$ 。采用该技术可快速实现绿化效果，坡面强度 0.4Mpa 左右，可抗 120mm/h 的降雨冲刷，经过一段时间，植被生长将逐步恢复自然状态效果。

#### 6. 投资估算

以深圳鹏城实验室边坡修复项目为例，总投资约 113.1 万元，其中设备投资 50 万元。

## 7. 技术成果转化推广前景

该技术同时配套植被混凝土技术等系列技术，具有工期短、安全风险小、修复效果好、景观效果佳等特点，应用范围已覆盖 20 多个省份，未来市场推广前景广阔。

## 五、环境监测与监控领域

### （六十七）水中放射性核素自动在线监测技术

#### 1. 技术名称

水中放射性核素自动在线监测技术

#### 2. 适用范围

市政供水、饮用水、地表水、核设施流出物等水体中的总放射性和放射性核素的监测。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

针对水体中放射性核素测量问题，利用不同放射性核素在膜材料上吸附特性与过滤特性的不同规律，研究专用膜浓缩分离技术，并将真空低温浓缩技术应用于环境辐射自动在线监测领域，将样品的浓缩时间从数日减少到几小时。针对现场自动化测量问题，利用树脂吸附分离技术及全液相传送方案，实现放射化学的现场自动化分离。针对多种核素同时在线测量的技术问题，通过 $\alpha$ 、 $\beta$ 射线信号的粒子种类、能量、计数等参数的综合分析，实现水体放射性核素的低本底、高效率、多指标、高精度的在线测量。仪器全程水样回收率 $\geq 70\%$ 。

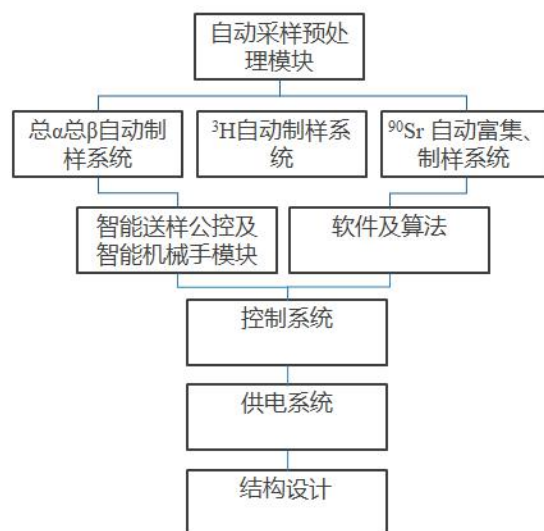


图 1 水中放射性核素的自动在线监测技术工艺流程图

### 3.2 主要创新点

(1) 攻克了脱气膜水中  $^{14}\text{C}$  气液自动分离技术、水体放射性核素分类自动快速富集制样技术、液闪谱仪探测效率自校准技术、小型可移动液闪谱仪  $\alpha$  和  $\beta$  脉冲甄别技术，以及总  $\alpha$ 、总  $\beta$  放射性直接测量技术等多项关键技术。

(2) 研发了能够自动测量水中放射性核素的水体放射性核素在线监测仪器。

(3) 实现一台仪器同时在线测量水体中总  $\alpha$ 、总  $\beta$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^3\text{H}$  活度浓度。通过可自由组合的模块化设计，研发出分别适用于饮用水、地表水、海水、核设施液态流出物等不同安全领域的系列化产品。

## 4. 污染治理或环境修复效果

探测效率 $\alpha \geq 90\%$ ,  $\beta \geq 85\%$ ,  $^3\text{H} \geq 60\%$ ,  $^{90}\text{Sr} \geq 78\%$ ; 采取全液相方法完成水样的取样、浓缩富集、制样和检测, 全流程在封闭管道和容器中完成, 不存在二次污染。

## 5. 技术示范情况

该技术已在饮用水源地、敏感核设施单位应用, 构建了新型监测模式, 形成单点或者多点组网的应用模式, 支持远程在线监测和实验室检测。

甘肃饮用水源地水体辐射环境在线自动监测站总体包括甘肃省核与辐射监测调度平台、网络化放射性核素在线监测系统和饮用水源辐射环境在线自动监测站(站点)三个层级。其中甘肃省核与辐射监测调度平台和网络化放射性核素在线监测系统布设在甘肃省核与辐射安全中心, 饮用水源辐射环境在线自动监测站(站点)布设在酒泉、嘉峪关、张掖、金昌、武威、白银、庆阳 7 个地市。该项目打造了一体化、自动化、网络化监测模式, 变离线为在线、变手动为自动、变单点为网络, 实现水源地辐射的自动在线测量和管理。实现对甘肃省重点饮用水源全覆盖, 实现饮用水辐射环境自动站数据上传, 并进行数据分析与预警, 实现对甘肃省 7 个地市水源地的水中总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 、 $^3\text{H}$  及  $^{90}\text{Sr}$  进行连续在线监测。

## 6. 投资估算

以独立监测站点建设为例, 站房费用约 40 万元; 单独购置总放射性核素设备, 一次投资约 160 万元, 购置全套设备(测

量总放射性核素、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^3\text{H}$ 等), 一次性投资约 630 万元, 技术整体寿命 20 年。

## 7. 技术成果转化推广前景

预计未来 5 年内, 水体放射性核素在线监测仪器的市场需求将达到 600 套, 具有广阔的市场前景。

### (六十八) 超低浓度紫外差分烟气分析仪

#### 1. 技术名称

超低浓度紫外差分烟气分析仪

#### 2. 适用范围

火电厂及其他固定污染源排放  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  的监测。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

针对固定污染源排放烟气中的超低浓度污染物 ( $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  等), 通过全程伴热测量技术、高温稳定紫外光源选型、长光程紫外吸收池自主设计、微型紫外光谱仪自主设计、多组分气体分析算法等相关技术研发, 开发了超低浓度紫外差分烟气分析仪, 实现了超低排放烟气中  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  等指标的便携式仪器监测。 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}$  检出限  $\leq 1\text{mg/m}^3$ ,  $\text{NO}_2$  检出限  $\leq 2\text{mg/m}^3$ 。

产品的工艺路线如图 1 所示, 主要包括紫外模块装配、冷凝器组件、烟枪组件等。

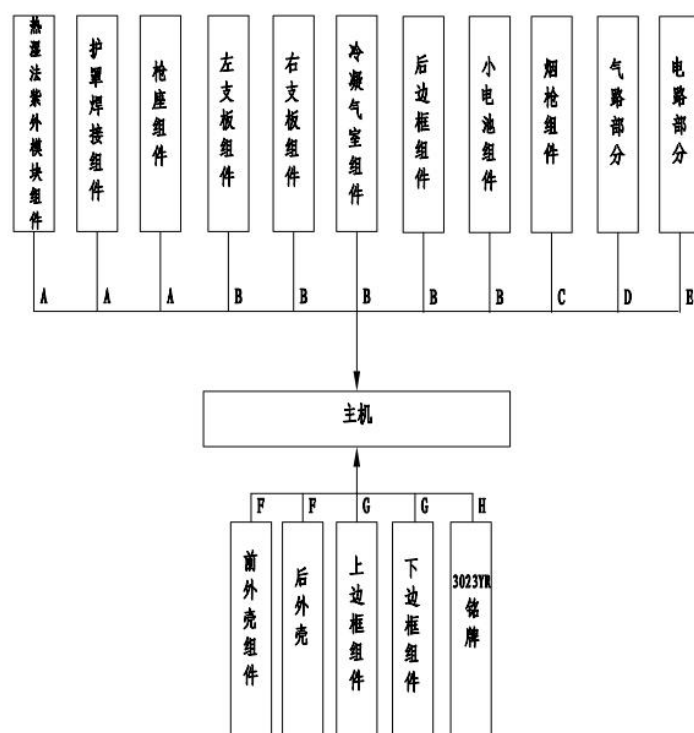


图 1 产品工艺路线图（图中 A、B、C 等表示装配顺序）

### 3.2 主要创新点

（1）采用原创设计的新型多次反射长光程紫外吸收池，光程稳定，不会因吸收池老化和污染而导致等效光程变化，保证吸收池长期使用中的光程稳定。采用多次反射技术，可同时实现小体积和长光程，可根据应用需求定制光程。

（2）开发了无光纤探测技术，有效解决了光源、光谱仪与高温吸收池隔离的问题，同时省去了光纤部件，提高了仪器可靠性，降低了成本。

## 4. 污染治理或环境修复效果

可同时测量烟气中超低浓度  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$  等指标，不受水分和粉尘影响；可直接检测  $\text{NO}_2$ ，无需  $\text{NO}_2/\text{NO}$  转换器；可

扩展检测  $\text{NH}_3$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  等其他气体。

#### 5. 技术示范情况

河南微米检测科技有限公司采购 1 台超低浓度紫外差分烟气分析仪，采用该仪器检测臭氧脱硝、氨气脱硝后烟气中各参数工况浓度，经与实验室测试数据比对，仪器工作正常， $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$  等指标检测结果准确；准确监测了该火电厂及固定污染源排放  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  的实际浓度，帮助企业进行超低排放监管，科学控制了燃煤电厂污染源的排放量。

#### 6. 投资估算

每台超低浓度紫外差分烟气分析仪 17 万元。

#### 7. 投资回收期

每台超低浓度紫外差分烟气分析仪投资回收期 0.23 年。

#### 8. 技术成果转化推广前景

该技术可对固定污染源排放烟气中的超低浓度污染物（ $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  等）进行准确、监测，为政府部门开展污染源调查和环境监管提供快捷的工具。随着国家污染物排放标准加严、环境质量要求提升和环保执法监管加强，环境监测行业具有广阔的市场需求空间。

### （六十九）气相分子吸收光谱仪

#### 1. 技术名称

气相分子吸收光谱仪

#### 2. 适用范围

地表水、地下水、污水和海水中氨氮、凯氏氮、总氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、硫化物等 6 项指标检测。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

气体分子受到外界辐射后，发生电子能级跃迁，跃迁过程对特定波长的光产生吸收，气相分子吸收光谱法就是基于该原理的一种测量方法。该方法中，气体浓度与吸光度在一定范围内呈现线性关系，而气体密度在平衡的化学反应体系中又与被测成分浓度呈线性关系，因此所测定的吸光度即与样品中被测成分浓度呈线性关系。

测试过程：首先通过化学反应，将水溶液中的离子或者分子态待检物转化为特定的待测气体，气体进入光谱仪的吸光管路中，在特定波长产生吸收，光电系统通过对光能量的采集，得到对应的吸光度值，从而进行定量测定。

产品波长范围：190nm ~ 400nm；噪声：±0.0002Abs；基线波动：≤0.0002Abs/2min；测量时长：2min ~ 5min；测量精密度：≤1%。

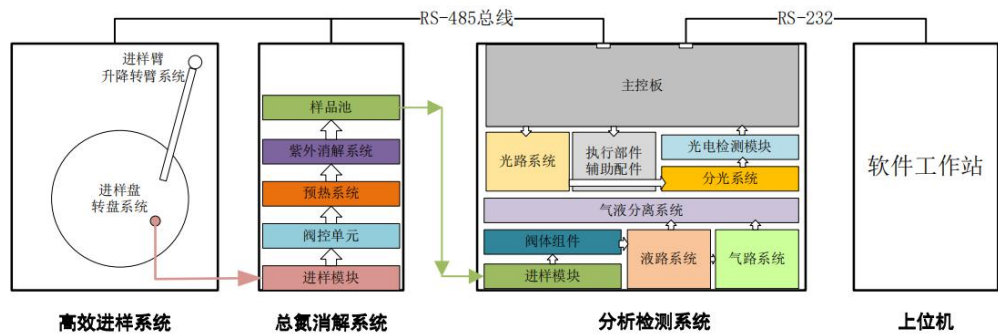


图 1 仪器整体设计构成图

### 3.2 主要创新点

(1) 研究了基于气相分子吸收光谱法的水质分析仪器的样品前处理模块设计，并提出功能模块化设计模型。

(2) 研发了气化反应分离关键技术，解决了基于气相分子吸收光谱法的水质分析仪器的核心化学反应稳定性技术难题。

(3) 研发了高灵敏度分光检测关键技术，解决了基于气相分子吸收光谱法水质分析仪器的光电检测技术难题。

(4) 建立了相关软件及多形态含氮含硫化合物谱图数据库。

### 4. 污染治理或环境修复效果

采用气相分子吸收光谱仪测定水样中氨氮、凯氏氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、总氮、硫化物等指标，具有抗干扰性强、无需复杂前处理等特点，将传统方法 10min/样 ~ 30min/样的测定时长缩短至 2min/样 ~ 5min/样，涵盖检测范围由 3 个数量级提高到 5 个数量级。同时提升了含氮含硫化合物的检测精度和可靠性，气化分离反应残留由 3% ~ 5% 降低到 <0.5%，测量精密度由原来 2% 提高到优于 1%，整机平均故障工作时间 (MTBF) >2000h，实现了氨氮、总氮、硫化物等污染物的快捷准确检测。

### 5. 技术示范情况

基于该方法开发的仪器已推广到 300 余家环境监测单位、水利水电机构、高校及科研院所、石油化工等生产企业。

中国环境监测总站采用气相分子吸收光谱仪测定水样中氨

氮等指标，自使用该仪器以来，在检测工作中代替了前处理过程中的部分手工操作，提高了测定速度，显著减少了相关试剂耗材的使用量，并大大降低了废液的排放。该仪器具有自动化程度高、受水样污染影响小、人为误差引入少等优点，能有效提高检测工作效率，降低实验人员劳动强度。

#### 6. 投资估算

1 套 AJ-3700 气相分子吸收光谱仪 30 万元，可使用 15 年。

#### 7. 投资回收期

每台光谱仪投资回收期 2.4 年。

#### 8. 技术成果转化推广前景

气相分子吸收光谱法已经成为国家标准监测方法，该仪器可广泛用于环境监测站、水文站、生产企业、科研院校等单位进行水体含氮化合物、硫化物等污染物检测，具有广阔的应用前景。

### （七十）基于人工智能的污染源精准识别—溯源分析—预测预报技术

#### 1. 技术名称

基于人工智能的污染源精准识别—溯源分析—预测预报技术

#### 2. 适用范围

城市污染状况识别、溯源及预测预报。

#### 3. 技术内容

将视频数据、污染物浓度、气象数据、排放源等多种数据源统一融合，运用人工智能（AI）技术进行污染源精准识别、溯源贡献度分析、污染物浓度预测预报。该技术实现了从底层数据源接入、数据处理、数据融合到特征提取、模型构建的一系列功能。

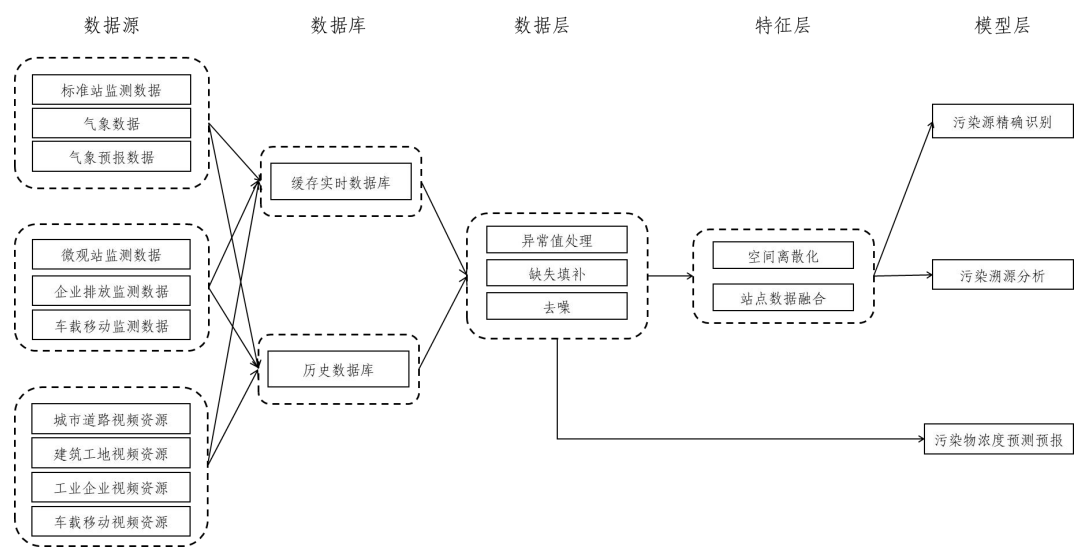


图 1 基于 AI 的污染源精准识别、溯源分析、预测预报技术路线

### 3.2 主要创新点

（1）提出了一种根据数据监测站点空间分布进行数据融合及异常处理的技术，将空间按照一定的方式进行区域划分，然后对同一区域的数据按照指定方式进行融合。对于仍然存在数据缺失的区域，通过高斯回归过程方法，综合考虑时域、空域信息和污染物浓度非线性变化情况，对缺失处进行非线性插值，从而有效提升数据的稳定性，消除噪声，同时还能起到数据降

维的作用。

（2）基于城市现有视频数据资源，使用 FSSD 检测模型和 ResNet 分类网络模型对渣土车是否遮盖、道路和工地扬尘进行智能识别，使得相关生态环境违法信息能够第一时间掌握，提升执法人员的办案效率，有效固定证据，与办案系统对接，实现精细化管理。

（3）结合卡尔曼滤波和全连接神经网络技术，可快速定量实时计算出中心站点所在目标区域内外污染物生成量占比以及各方位输入污染物贡献度，便于有关人员针对性地采取相关措施进行管控处置。

（4）开发了基于 AI 技术区域大气污染预测模型，实现对 6 参数污染物浓度在未来时期长时间变化的小时级精确预测。

#### 4. 污染治理或环境修复效果

可及时掌握生态环境违法信息，有效固定证据，实现快速发现、快速响应、应急指挥等执法闭环；实现污染治理的动态调度和实时管控，完成从发现问题到解决问题的闭环管理。经统计，模型预测范围的准确率比其他同类技术平均高 78%。

#### 5. 技术示范情况

该技术已在北京大兴区、重庆合川区、太原清徐、山东聊城、安徽淮北等多个城市应用。重庆市合川区智慧环保项目中，将环境监测设备安装在社会营运车辆（出租车、公交车等）上，对大气环境进行移动监测，发现烟雾燃烧、渣土车未苫盖、黑烟车等

污染事件后，自动报警并将信息合成数据推送到平台与物联网设备进行联动展示，精确定位，方便网格员快速处理问题，同时结合“市、区、乡、社区”四级环保网格化管理机制，实现了相关污染事件处理全程留痕、绩效考核量化，有效支持了环境管理决策，也为环境应急管理提供了快速可靠的数据支撑。

## 6. 投资估算

按全国 117 个重点城市级别估算，每个城市的投资约 2000 万元。

## 7. 投资回收期

投资回收期为 2~3 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

该技术将人工智能技术与物联网大数据分析相结合，实现城市复杂污染场景智能识别，空气质量溯源与预测，为生态环境管理提供了高效、快速识别、准确的决策支持，解决了违规事件取证难、取证慢的问题，改变了过去依靠人海战术巡检效率低、投入高的局面，提升了环境治理工作效率，优化了城市人力资源配置，未来发展前景非常广阔。

# （七十一）工业集中区大气污染物立体监测系统

## 1. 技术名称

工业集中区大气污染物立体监测系统

## 2. 适用范围

工业集中区大气污染物的时空分布研究、溯源和精准管控。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

系统包括无人机大气成分与气象参数监测系统（以下简称“无人机大气监测仪”）、开放光路多组分气体分析仪（以下简称“开放光路分析仪”）、微型空气质量监测站及质子转移反应飞行时间质谱（PTR-TOF-MS）走航车为一体的大气立体监测系统。无人机大气监测仪主要通过无人机搭载微型大气监测仪对  $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{NH}_3$ 、TVOCs、 $\text{O}_3$ 、CO、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、NO、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{PM}_{1.0}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$  等 10 多项大气污染物进行检测，检出限为  $\mu\text{g/L}$  级（ $\text{CO}_2$  除外，为  $\text{mg/L}$  级）；同时可对大气温度、湿度、大气压、风向、风速气象参数进行实时监测，对重点污染区域进行精准溯源，同时针对突发污染事件，可精准溯源检测污染物浓度并快速采集气体样品，实时拍摄并传输污染区域的现场视频；开放光路分析仪采用对射式光路结构设计，利用傅里叶红外吸收光谱技术对重点企业的有毒有害气体进行在线监测以及排放通量的走航监测，能够达到对园区现场多种 VOCs 实时监测的要求；微型空气质量监测站具有体积小、耗电量低、运维需求小的特点，便于大规模布点，可应用于工业园区及城市网格化布点，探究大气污染物的分布特征和来源分析；PTR-TOF-MS 走航车实现了对园区 VOCs 重点污染企业和区域进行走航监测，实现实时快速测量监测重点企业和区域的大气 VOCs，识别 VOCs 的排放特征和二次污染物的形成潜势。

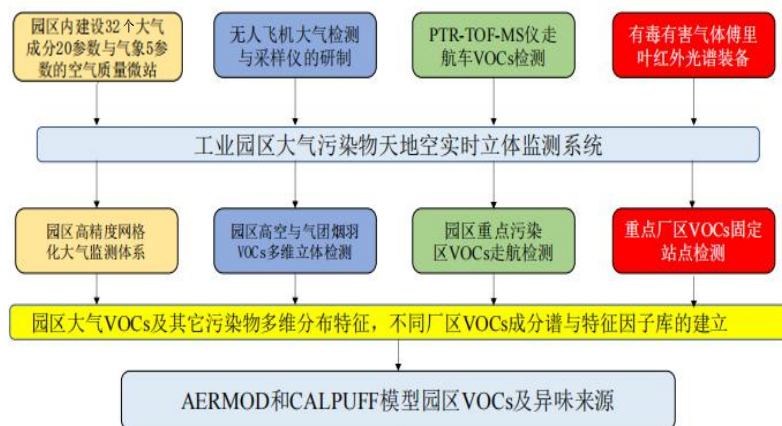


图 1 工业集中区大气立体监测系统工作示意图

### 3.2 主要创新点

(1) 研发了无人机大气监测仪，与高精度、高时间分辨率的环境监测相结合，当发生突发污染事件时，能及时解决污染源“最后一公里”定位难的问题，该套仪器有效弥补了高空污染物监测技术缺失的现状。

(2) 研发了开放光路分析仪，创建了有毒有害气体高温光谱数据库和排放通量解析算法，实现了以太阳为光源，通过移动平台搭载红外光谱仪测量整层大气太阳红外吸收光谱，定量反演有毒有害气体垂直柱浓度。

(3) 研发了适用于高密度网格化监测的微型环境空气质量监测站，可实现 10 种主要大气污染物浓度以及气象参数的快速监测，并实时上传到云端监控平台，可实时掌握园区污染物浓度的动态变化特征。

(4) 研发了 PTR-TOF-MS 走航车, 具有高灵敏度, 检出限低至 ppt 量级, 并可检测痕量污染物; 响应速度快, 可在(50 ~ 100) ms 内快速甄别污染物; 伴热进样系统及钝化处理, 可直接分析 SVOCs; 无需载气, 耗材用量少和维护成本低; 采用独特设计, 减少离子损失, 所需样品量少, 适合微环境监测。

#### 4. 污染治理或环境修复效果

该系统可提高当地生态环境管理部门工作效率, 节省大量人力物力。根据对上虞园区大气污染物排放企业的筛选与调查, 筛选出重点排放企业 143 家, 形成了基于企业—污染物—技术—减排量的“一企一策”大气污染控制技术工程清单。

#### 5. 技术示范情况

浙江上虞工业园区面积约 21km<sup>2</sup> (3km×7km), 该系统园区建设了 32 个微型空气质量监测站点, 并配备了无人机监测系统、开放光路监测系统和车载 VOCs 在线监测系统。无人机大气监测仪主要针对高空环境大气污染物进行监测, 并根据地面端平台实时显示的浓度数据摸排重污染物区域, 及时进行拍照取证。开放光路分析仪主要针对园区内重污染企业排放的有毒有害气体进行实时监测; 环境走航监测包括有毒有害气体排放通量(开放光路分析仪)走航和动态 VOCs 实时溯源分析走航(PTR-TOF-MS); 微型空气质量监测站形成了多点位网格化的大气质量监测。

#### 6. 投资估算

上虞工业园区立体监测系统所需主要设备包括六旋翼无人机、微型大气检测仪、苏玛罐采样装置、开放光路分析仪、微型空气质量监测站、掩日红外车载 VOCs 排放通量遥测走航车、PTR-TOF-MS 车载 VOCs 在线监测走航车等,投资共计 1110 万元。

## 7. 技术成果转化推广前景

我国工业园区的环境风险预警体系建设刚刚起步,对园区大气环境综合监测有强烈的技术需求。该工业集中区大气污染物立体监测系统可有效针对复杂的工业园区进行污染物溯源和分析,具有较好的发展前景。

## (七十二) 基于复合光谱的机动车污染排放动态精准监测技术及系统

### 1. 技术名称

基于复合光谱的机动车污染排放动态精准监测技术及系统

### 2. 适用范围

机动车尾气监测。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

采用高频调谐半导体激光光谱 (ETDLAS) 和紫外差分吸收光谱 (UV-DOAS) 联用技术,研究过量空气系数脉谱修正燃烧方程的浓度反演算法,实现了对机动车污染物 (废气和颗粒物) 排放的动态监测。技术原理图如图 1 所示。

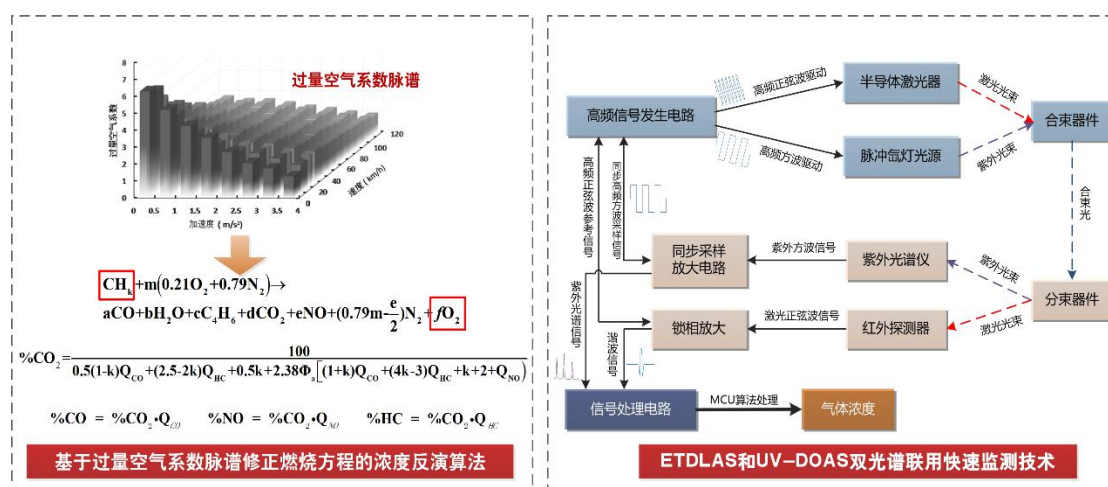


图 1 基于复合光谱的机动车污染物动态监测技术原理图

废气（CO、CO<sub>2</sub>、HC、NO）测量示值误差和重复性分别为±5%和 2.5%，不透光度测量示值误差和重复性分别为±5%和 1%，响应时间<0.22s，仪器测量 24h 的漂移量不超过示值误差。

### 3.2 主要创新点

（1）研发了 ETDLAS 技术，设计了单高频正弦波调制控制驱动，提高了测量响应速度；开发了复合光谱谐波比率与实时重叠光谱分离算法，解决了多变环境参数及多组分交叉干扰对测量精度的影响。

（2）开发了互为收发系统的 ETDLAS 和 UV-DOAS 双光谱联用快速监测技术，实现对同一尾气不同组分的无时差快速监测，解决了分立多单元联测响应慢的难题。

（3）产品具有集成度高、安装方便、响应时间短等特点，

在双光谱检测与光路设计、多重减震和光学遥测装置上有创新。

#### 4. 污染治理或环境修复效果

监测的机动车尾气排放参数包括 CO、NO、HC、CO<sub>2</sub>，不透光度 5%、林格曼黑度 ≤0.25 级；在尾气管后置条件下，满足 24h 污染物和黑烟的有效烟团捕获率不低于 90%。

#### 5. 技术示范情况

该技术可广泛应用于道路交通环境管理的路检、抽检、年检等，通过在城区各典型地段合理布设，形成在线监控网络，为决策研究者及地区机动车尾气污染控制提供科学依据，目前已成功应用于巴彦淖尔市环境信息监控中心、岳阳市生态环境局、赣州市宁都生态环境局、广元市生态环境局、新疆生产建设兵团第八师生态环境局等尾气遥感监测专用系统设备项目。

巴彦淖尔市环境信息监控中心机动车遥感监测专用系统设备项目，在 G242 国道点位、G110 国道城关镇点位和 G110 国道五原县点位的城市入口安装了 3 套固定水平机动车尾气遥测系统，该项目每个点位均可实现 24h 无人值守不间断监测，全年完成抽检次数 150 万次，有效检测次数 100 万次。

2019 年底该市机动车保有量约 32.3 万辆，按照筛选 5%左右的高排放车计算，预计每年将减排 CO1929t、HC473t、NO<sub>x</sub>1589t、PM18.5 万 t。

#### 6. 投资估算

一套设备投资合计 180 万元。

## 7. 投资回收期

以巴彦淖尔机动车遥测项目为例，总投资 688 万元，投资回收期约 1.8 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

近年来，国家陆续出台了移动污染源监管的法规，市场需求逐步增加。预计全国约 350 个城市需采购遥测设备,具有良好的应用前景。

# 六、节能减排与低碳领域

## （七十三）IE4 效率电动机设计技术

### 1. 技术名称

IE4 效率电动机设计技术

### 2. 适用范围

电机制造行业。IE4 能效等级电动机分为三相异步电动机（功率范围 0.55kW ~ 1000kW）和三相永磁同步电动机（功率范围 0.55kW ~ 90kW），可与风机、水泵、压缩机、机床等设备配套使用。与 Y、Y2、Y3、YE2、YX3 和 YE3 等系列电动机产品有良好互换性。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

IE4 效率电动机达到《电动机能效限定值及能效等级》（GB 18613-2020）中的二级能效，比目前国内常用的 Y 系列电机效率平均提高约 5.4%。通过新型绕组、合理选用冷轧硅钢片和永

磁材料等设计技术，以及降低电机损耗的铁心加工工艺、转子加工工艺等关键工艺，实现符合 IE4 效率标准等级的电动机以下系列产品的开发。其包括 YZTE4 系列（IP55）铸铜转子三相异步电动机、YE4 系列（IP55）三相异步电动机、TYE4 系列（IP55）自启动永磁同步电动机。



图 1 YZTE4 系列（左）、YE4 系列（中）、TYE4 系列（右）电动机

### 3.2 主要创新点

IE4 效率电动机系列产品比国外同类产品功率范围大、机座范围宽、极数齐全。

（1）YZTE4 系列（IP55）铸铜转子三相异步电动机，功率范围：0.55 kW ~ 22kW；极数范围：2、4、6、8 极；机座号范围：80 ~ 180；规格：44 个；功率等级和安装尺寸的对应关系：与 Y 系列等产品相同。

（2）YE4 系列（IP55）三相异步电动机，功率范围：0.55 kW ~ 1000kW；极数范围：2、4、6、8 极；机座号范围：80 ~ 450；规格：131 个；功率等级和安装尺寸的对应关系：与 Y 系

列等产品相同。

(3) TYE4 系列 (IP55) 自启动永磁同步电动机, 功率范围: 0.55 kW ~ 90kW; 极数范围: 2、4、6、8 极; 机座号范围: 80 ~ 280; 规格: 55 个; 功率等级和安装尺寸的对应关系: 与 Y 系列等产品相同。

#### 4. 节能与温室气体减排效果

目前我国在使用的大多数电动机平均效率为 87.62% 左右, IE4 效率等级电动机平均效率达 93.06%, 提高 5.44%。按 2000 万 kW、年运行时间 5000h 计算, 年可节电 66.72 亿度, 折合节约标煤 82 万 t, 减排二氧化碳 380.50 万 t。

#### 5. 技术示范情况

该技术成果已推广转让给电机行业制造企业 32 家、冲片铁心专业制造企业 6 家和铸铜转子专业制造企业 3 家, 已形成 2000 万 kW 以上的生产能力; 完成了上海市企业节能改造设备 23 台 (套); 在海光集团的生产设备 40T 冲床上进行测试对比, YZTE4-112M-4、4kW 铸铜转子三相异步电动机与 Y112M-4 三相异步电动机进行实际运行用能测试, 节电率达到 5.56%; 在南方泵业的拖动端吸离心泵进行测试对比, YE4-160L-2、18.5kW 三相异步电动机与 YE2-160L-2 三相异步电动机进行实际运行用能测试, 节电率达到 5.4%。

#### 6. 投资估算

IE4 电机使用及维护简单、方便, 使用寿命一般可达 20 年。

运行维护费用及人工费（工资）、设备折旧费、修理费、管理费等维护费用与普通的 Y、Y2、YX3、YE2 等系列电机相同，无需新增额外的其他费用。

### 7. 投资回收期

以 YE4-160L-2、18.5kW 电动机为例，与原配用的 YE2-160L-2 相比，电机有效成本增加约 1600 元/台。每年按运行 5000h 计，用电可减少 4995 度，电费按 0.5 元/度计算，8 个月即可收回投资成本。

### 8. 技术成果转化推广前景

IE4 效率电动机与市场上常用的 Y、Y2、Y3、YE2、YX3 和 YE3 系列三相异步电动机产品有良好的互换性。目前我国现有电动机的装机容量为 25 亿 kW，高效率电机的市场份额还比较小，技术推广前景广阔。

## （七十四）热泵喷气增焓转子式变频压缩机技术

### 1. 技术名称

热泵喷气增焓转子式变频压缩机技术

### 2. 适用范围

北方低温寒冷地区住宅和商用建筑的采暖热泵，解决低温环境下系统制热衰减的问题，产品能力单台可以做到 16HP，但冷媒特性要求环境温度不低于 -30℃，否则机组无法正常运转。

### 3. 技术内容

### 3.1 技术原理

技术成果通过开发热泵采暖专用压缩机，热泵喷气增焓转子式变频压缩机依托热泵技术和喷气增焓技术，形成适合大规模产业化的“R410A/R32+喷气增焓+变频”技术模式。喷气增焓的系统结构原理如下：从冷凝器（使用侧）出来的液态制冷剂分为两路，主路为制冷剂回路进入经济器，与支路换热后经过节流直接进入蒸发器（室外热源侧），辅路为补气回路，节流后与主路在经济器内换热，冷媒闪发为气态，通过辅路进入压缩机泵体中，与原有的冷媒混合，增加了压缩机中的冷媒质量流量，实现制热量的提升。

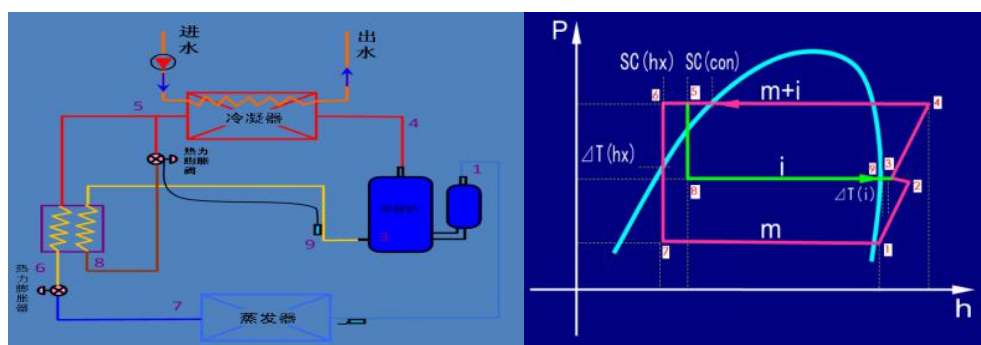


图 1 喷气增焓的系统结构原理

### 3.2 主要创新点

（1）特殊设计喷射管结构，采用中间板喷气路径，实现对上下气缸的交替喷气，增加低温环境工况下系统的制热量和制热能效，同时降低冷媒的排气温度，提高可靠性。相比于普通

压缩机，补气回路的增加使系统和压缩机结构更复杂，通过采用 DLC 叶片、球墨铸铁曲轴、合金活塞等部品材质的提升保证可靠性，通过超精加工减小间隙、降低油循环量技术保证性能。

(2) 为满足低温环境下 65℃出水的苛刻要求，低温采暖转子式压缩机长时间处在大压比负载下，轴受比较恶劣，为了满足可靠性的要求，对重要的摩擦部品进行特殊的表面处理。为满足部分商用采暖、热水项目的要求，开发大规格转子式压缩机，采用多支撑结构确保压缩机在高速高负荷时轴系的可靠性和稳定性，并且自润滑轴承、主动供油到多支撑部位，确保润滑。

#### 4. 节能与温室气体减排效果

作为供暖机组核心动力零部件，转子式压缩机采用喷气增焓技术进行优化，在名义制热工况下，能效提升 12.8%，系统名义制热能效平均在 2.1 以上，理论上可节省原煤消耗总量的 50%以上。以北方 100m<sup>2</sup>的住户在环境温度-12℃使用为例，采暖季一般运行时间平均 4 个月，燃煤总消耗量约为 2t（相当于 1.8t 标准煤），在低温工况下能效 2.1 以上，相当于 857kg 标准煤，节省 943kg 标准煤，减少 CO<sub>2</sub> 排放 2470kg；按年销量 20 万台计算，节煤量 18.86 万 t/a，CO<sub>2</sub> 减排量 49.4 万 t/a。

#### 5. 技术示范情况

该技术成果已在多家客户处匹配，共安装 100 万余台。以北方某项目为例，采用该产品搭载机组在北方试点运行，2017 年稳定运行一个采暖季，低温名义工况下性能 2.41，节省燃煤

1053kg 标准煤/台，减少 CO<sub>2</sub> 排放量 2759kg/台。

## 6. 投资估算

与普通转子式压缩机相比新增喷气管，部分零部件结构更新，需要投入和改造设备来满足热泵采暖压缩机的特殊要求，如偏心精磨抛光机改造、总装总成流水线改造、焓差室系统试验设备改造等。

以产能 20 万台/月的采暖压缩机（大规格）生产线投资改造为例，技术产品寿命 10 年，初期投资 1400 万元，生产线运行费用 850 万元/月。

## 7. 投资回收期

以产量 20 万台的采暖压缩机生产线投资改造为例，回收期约 6 个月。

## 8. 技术成果转化推广前景

该技术为全球首家推出的热泵喷气增焓转子式变频压缩机，拥有完全的自主知识产权，已申请并获得专利几十项。当前热泵仅占采暖行业市场容量份额 1%左右，采用喷气增焓的转子式压缩机则更少。随着国家节能减排工作不断深入，清洁能源供暖是未来发展趋势。低温热泵产品技术应用会稳定发展，未来有较大的推广空间。

# （七十五）高效永磁同步变频离心式冰蓄冷双工况机组设计制造技术

## 1. 技术名称

## 高效永磁同步变频离心式冰蓄冷双工况机组设计制造技术

### 2. 适用范围

以水为介质，夜间谷段电力（低电价）以低温冷冻冰形式储存冷量，白天用电高峰时段（高电价时）使用储存的低温冷冻水来作为冷源的冰蓄冷中央空调系统。特别适用于有峰谷电价差的大型制冷系统。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

通过研制高效率、高转速、大功率的中高压变频系统，实现了大功率高速永磁电机变频调速，提升变频双工况机组的单机制冷量。通过“双工况多点气动设计方法”，均衡压缩机制冷和制冰双工况气动设计效率，满足机组制冷和制冰双工况压比高、变化大的要求，提高机组工况适应性，保证了机组制冷和制冰工况高能效。对于大冷量机组采用独立双系统串联逆流设计，满足了冰蓄冷大冷量和变负荷稳定运行的要求，提升可靠性。

#### 3.2 主要创新点

（1）创新高压大功率变频系统。研制了一种通过对 10kV 等中高压电压的调节设计，将 720V 以下的电压作为变频装置的输入，0-720V 输出作为变频装置的输出至压缩机电机端，实现高效率、高转速、大功率的中高压变频系统。解决了低压 380V 电机受导线承受能力限制、功率难以做大、生产时嵌线复杂，以及采用 10kV 等中高压直接输入变频器需要采用移相变压器

和多模块级联、变频装置体积庞大且转速低的问题。

(2) 高效双工况多点气动设计。针对机组制冷和制冰双工况压比高、变化大的特点，发明一种“双工况多点气动设计方法”，均衡压缩机制冷和制冰双工况气动设计效率。根据双工况多点气动设计方法，优化压缩机气动部件设计。研制了三元闭式全长叶片叶轮、“低稠度”叶片扩压器和串列叶片回流器，保证机组双工况高能效，提高喘振隔离裕度，扩展运行范围。

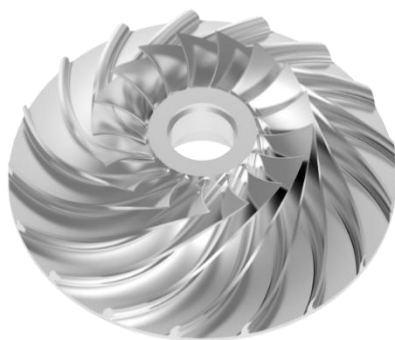


图 1 双工况多点气动设计的自由曲面叶轮

(3) 研制新型大功率高转速的永磁同步电机，采用低压成型绕组，满足 660V 额定电压输入，兆瓦级轴功率输出，并通过定转子冲片设计、冷却流道设计和主轴强度设计等，解决大功率电机冷却、轴承腐蚀、转子重和长所引起的刚性不足等一系列技术难题，成功实现了电机在 10kV 配电、兆瓦级轴功率输出条件下的高速运行。电机全工况运行效率在 94% 以上，最高可达 97%。

(4) 采用分段优化的智能模糊 PID 控制和逐级逼近目标的控制，保证机组启动过程水温平稳且控制精确，杜绝水温波动，延长制冰时间，提升制冰效率。采用了“四级”防喘措施，通过扩宽压缩机喘振裕量设计、变频调节防喘振控制、设置辅助热气旁通措施以及设置喘振保护使得机组在正常使用条件内无喘振运行。同时，关键部件采用冗余设计等措施，保证机组可靠。

(5) 独立双系统串联逆流设计。既可均衡两压缩机的压缩比和负荷，提升效率，又可通过双压缩机联合运行，满足冰蓄冷大冷量和变负荷稳定运行的要求，提升机组可靠性。

#### 4. 节能与温室气体减排效果

以 1 台 2400RT 冰蓄冷双工况离心式冷水机组为例，对传统定频机组与高效永磁同步变频离心式冰蓄冷双工况机组运行能耗进行简单对比。制冷按 AHRI 标准部分负荷时间权重，制冰按满负荷进行能耗计算。结果表明，高效永磁同步变频离心式冰蓄冷双工况机组比传统定频离心式冰蓄冷双工况机组节约能耗约 172 万 kW·h，节能 26%。折算节约标准煤 211.39t，减少二氧化碳排放量 980.92t，减少二氧化硫排放量 13.4t，减少氮氧化物排放量 3.92t。

#### 5. 技术示范情况

项目已在 29 项工程中应用，如中国尊、北京大兴国际机场等大型集中供冷项目。

以珠海横琴冷站为例，其属于横琴多联供燃气能源站项目构成之一，与其配套管网负责横琴供冷项目。现阶段划分五大供冷片区，拟建 9 个冷站，总装机规模达 30 万冷吨，总投资近 30 亿元。其中的 3 号冷站已采用一台本项目 2400 冷吨机组 LSBLX2400SVI，2017 年 7 月投入使用至今，运行情况良好。

2017 年 9 月，经合肥通用机电产品检测院进行委托检验，测得机组制冷工况（冷冻出水温度  $1.5^{\circ}\text{C}$  ~ 冷却进水温度  $32^{\circ}\text{C}$ ）制冷量 7519.553kW，性能系数 5.04；蓄冰工况（ $-5.6^{\circ}\text{C}$  ~  $30^{\circ}\text{C}$ ）制冰量 6787.688kW，性能系数 4.30，满足标称量。

## 6. 投资估算

项目技术集成于高效永磁同步变频离心式冰蓄冷双工况机组。设备设计寿命 25 年，制冷量 2400RT 的机组采购费用 480 万元/台。使用期间还需投资维护保养费用。

一台 2400RT 双工况机组年运行耗电量 490 万  $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，按高峰时段电价 1.1 元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，峰谷电价比 4:1，则低谷时段电价 0.275 元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，年运行电费约 302 万元。

## 7. 投资回收期

假定使用定频单冷机组计算年运行费用 570 万元；而一台 2400RT 该技术机组年运行电费约 302 万元，相比全部采用定频单冷机组运行方案节约电费 268 万元。设备初投资 480 万元/台，则投资回收期为 1.8 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

高效永磁同步变频离心式冰蓄冷双工况机组具有突出的节能优势和对冰蓄冷系统的适应性，具有广泛的推广应用价值。目前我国每年公共建筑新增面积约 3 亿  $\text{m}^2$ ，如其中 30% 采用高效永磁同步变频离心式冰蓄冷双工况机组，每年可节约电费 11.5 亿元，节煤 96 万 t，减少二氧化碳排放 260 万 t，减少二氧化硫排放 3.5 万 t。

### （七十六）旧电机永磁化再制造技术

#### 1. 技术名称

旧电机永磁化再制造技术

#### 2. 适用范围

矿山、冶金、机械、石油、化工、建材、陶瓷、纺织等行业设备电机节能改造。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

充分利用旧（低效）三相异步电动机机壳、定子、转子等零部件，对电动机转子母体重新加工，将磁钢表贴于转子之上，形成新的电动机永磁转子。通过再制造的永磁电动机结构简单，使用和维护方便。再制造电机性能指标符合国家相关标准，其电机效率满足《永磁同步电动机能效限定值及能效等级》（GB 30253-2013）能效 1 级要求，功率因数在 0.90 ~ 0.98 之间。

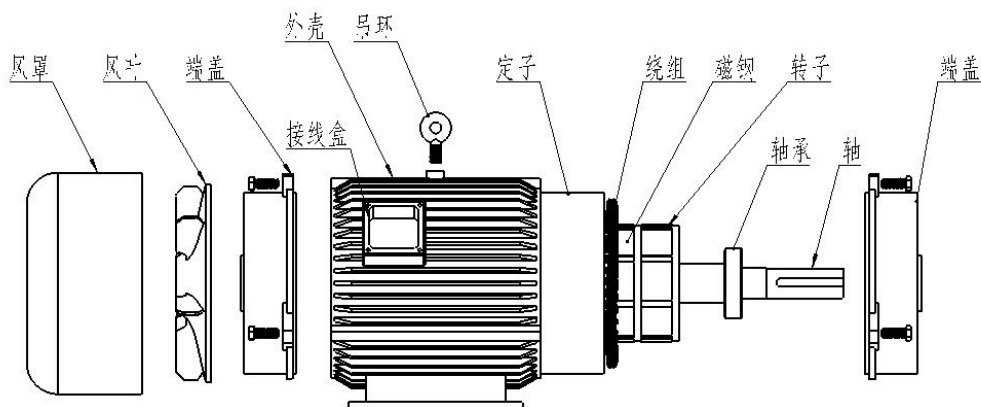


图 1 再制造产品结构示意图

### 3.2 主要创新点

(1) 磁钢的配方创新：电机转子的磁钢在钕铁硼材料中，按千分之五的比例添加一种高阻非金属材料，降低了磁钢在电机运行中产生的温度，提高了磁钢运行的可靠性，减少了磁损耗，达到节能效果。

(2) 磁阻材料配方创新：磁阻材料主要由珍珠粉、铁粉、树脂按照一定的比例制备而成。使用这种磁阻材料后可以增大电机的直轴电抗，能充分利用转子与定子间的气隙磁场，有利于转子磁场纯正正弦波的形成。

(3) 结构创新性：普通永磁电动机不可能产生纯正弦波磁场。该技术在再制造的电机转子外围的磁钢采取独特的形状和排列，配合独特磁阻材料的作用，使转子磁场与定子磁场的波形同步，形成纯正正弦波磁场，消除谐波的不利影响，不产生

退磁和反向转矩，温升高，从而具有显著的节能效果。

(4) 保护系统的结构创新：在接线盒内安装保护系统，有效防止事故发生。

(5) 关键创新工艺：永磁化电机再制造清洗工艺、永磁化电机再制造拆解工艺、旧电机关键零部件的再制造检测工艺、老旧电机转子加工工艺、浸漆烘干工艺、喷漆工艺，损伤件再制造修复工艺。

#### 4. 节能与温室气体减排效果

通过该技术再制造后电机效率符合国家 1 级能效标准，综合节电率在 10%~30% 之间。获得国家质量认证中心（CQC）节能产品认证。

如果按废旧电机保有量的 2%，每年形成 5000 万 kW 的改造能力，按每年运行时间 6000h，负载率按 50% 计算，耗电 1500 亿 kW·h，按 10% 节电率计算，可节约 150 亿 kW·h，相当于节约标煤 184.35 万 t，减少二氧化碳排放量 855.45 万 t。

#### 5. 技术示范情况

目前利用该技术再制造后的电机在市场上已经投放了 8 万多台（约 88 万 kW）。其中在东鹏陶瓷集团有限公司、浙江嘉兴中辉纺织有限公司、淮南矿业、盘锦辽河油田华联实业集团有限公司、长城汽车股份有限公司、亚东水泥等多家公司进行示范应用，节电率均超过 15% 左右。通过用户反馈，预计每千 kW 再制造电机平均每年可为用户节约电达 68 万度。根据目前市场

应用情况，每年为用户节约电量约 5.984 亿度，折合减少标准煤消耗 7.35 万吨，减少二氧化碳排放 34.13 万吨。

以东鹏陶瓷集团有限公司为例，东鹏集团分别在清远基地电机节能改造 1848kW，丰城生产基地二车间抛光线节能改造 2617.5kW。原电机是异步电机，负荷大转速慢，负荷小转速快，大约 1420 ~ 1500r/min，空载电流在 8.6A ~ 10.8A 左右，随着负载增大而增加电流约为 12.2A ~ 13.4A。采用该技术再造后的同步永磁电机，无论负荷大小转速恒定，空载电流 2.6A ~ 3.2A，负载增大后电流为 5.5A ~ 6.3A。项目形成的永磁化再制造高效电机效率符合国家 1 级能效标准，综合节电率大于 15%，功率因数大于 0.95。相对新品高效电机实现节能 2% ~ 3%，再制造成本仅为新品高效永磁电机的 85%。废旧电机的旧件利用率达到 90%以上，寿命达到或超过新电机。

## 6.投资估算

东鹏陶瓷抛光线 160M-4-11kW 270 台 Y2 系列电机进行高效化节能改造工程，原低效电机全部更换永磁化再制造后的高效同步电机，合计 4465.5kW，投入 144.34 万元。

## 7.投资回收期

东鹏陶瓷抛光线 Y2 系列电机节能改造工程投资回收期约 0.62 年。

## 8. 成果转化推广前景

该技术可将低效率的传统异步电机再制造升级为低成本的

高效永磁再制造电机，再制造后电机效率达国家 1 级能效标准，按废旧电机保有量的 2% 改造计算，每年可形成 5000 万 kW 的改造能力，有较大的推广空间。

## （七十七）永磁式大功率能源装备多机智能调速节能技术

### 1. 技术名称

永磁式大功率能源装备多机智能调速节能技术

### 2. 适用范围

能源领域及化工行业高速、大功率电机调速传动系统，上游匹配异步电机、下游匹配减速器或直接匹配负载，适应高温、低温（-40℃）、高粉尘环境。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

永磁式大功率能源装备多机智能调速节能技术基于电磁感应原理，通过电机带动导磁体盘切割永磁体磁力线产生感应涡流，在涡流磁场与永磁体磁场相互作用下生成转矩带动永磁体盘旋转，驱动负载运行，并通过自主调节导磁体盘和永磁体之间的气隙精确控制传递扭矩大小，实现不同特性负载输出转速和输出扭矩的精确调节。采用 MRAS 智能控制策略实现恒扭矩负载的软启动，减小电机及设备损伤，缩短电流浪涌时间；采用模糊自适应整定 PID 控制策略控制多机驱动场合电机输出功率，按需出力，实现多机功率均衡控制，节省电能；应用于离心式负载调速时，可实时精确调节流量，减少阻力损失，节能

降耗。



图 1 永磁调速装备整机图

### 3.2 主要创新点

(1) 揭示了高速运行状态下磁场、热场、流场及力场等多物理场动态耦合机理，提出多场耦合计算方法，实现传递扭矩及各场分布的精确计算，解决了大功率下传动能力不足的问题。

(2) 提出了流固耦合传热结合多重参考系模型的温度场精确表征方法，有效表征铜导体及永磁体等关键零部件温度分布，指导散热设计，解决了温度场表征难题及高温导致的运行故障。

(3) 揭示了不同气隙下轴向力变化规律，设计了基于正弦曲线的调速曲线，开发了正弦曲线调速沟槽与齿轮齿条及内外套结合的全行程多点定位调速机构，满足气隙高精实时调节需求。

(4) 提出了模型自适应法及模糊自适应整定 PID 控制法，开发了大功率煤机装备软启动及多机功率平衡智能控制系统，

解决了电机过载、皮带断裂等技术故障，实现了离心负载自主流量调节，节能显著。

(5) 提出了恶劣工况下基于有限测点实测结合全场分布信息估算的多参量状态在线感知方法，实现永磁调速装备内部全场信息精确获取，解决封闭空间下磁场、温度场等运行参数无法测量而导致故障发生的测量难题。

#### 4. 节能与温室气体减排效果

应用于恒扭矩负载调速传动系统，实现负载启动加速度 $\leq 0.15\text{m/s}^2$ 、启动时间 $\geq 20\text{s}$ ，多机功率不平衡度 $\leq 3\%$ ，节能率 $10\% \sim 20\%$ ；应用于离心负载调速，可解决“大马拉小车”及阀门节流损失问题，节能率 $15\% \sim 30\%$ 。

如果按照永磁调速装备市场占工业节能调速领域总量的 $5\% \sim 10\%$ 计算，每年可节约电量 $21.5 \text{ 亿} \sim 28.7 \text{ 亿 kW}\cdot\text{h}$ ，折合成标准煤约为 $26.4 \text{ 万} \sim 35.3 \text{ 万 t}$ ，减少 $\text{CO}_2$ 排放 $122.6 \text{ 万} \sim 163.7 \text{ 万 t}$ 。

#### 5. 技术示范情况

该技术作为国内唯一通过国家安标认证的永磁式调速节能手段，目前已成功应用于陕西黄陵煤业、山西阳泉煤业、山东金源煤矿、内蒙古神华煤业等二十余家煤矿现场，装机功率 $75\text{kW} \sim 400\text{kW}$ 不等，运行时间 $3 \sim 5$ 年，节能 $10\% \sim 20\%$ ，解决了煤矿井下恶劣工况高效、高稳态传动技术难题。

该技术亦成功应用于湘潭钢铁集团、天津中海油、国投宣

城电厂、国电泰州、中科院沈阳自动化研究所水下机器人等十余个现场，装机功率  $2\text{kW} \sim 1000\text{kW}$  不等，运行时间  $3 \sim 5$  年，不仅解决动密封失效、不对中振动等问题，还克服了“大马拉小车”及阀门节流损失造成能源损耗问题，节能  $15\% \sim 30\%$ ，节能效果显著。

## 6. 投资估算

该技术及对应规模下的设备根据功率及转速不同，投资额不同，小功率情况下投资约为几万元到几十万元不等，大功率情况下投资约为几十万元到百万元不等。该设备为纯机械结构，无需介质传动，运行期间几乎免维护，极大降低了维护费用；同时，该设备已突破多项技术攻关，各零部件设计合理、加工精度满足要求，运行可靠，并具有温度、转矩等技术参数在线监测及故障诊断功能，技术寿命长达 10 余年。

## 7. 投资回收期

小功率设备投资在几万元到几十万元不等，年节电量约为  $10 \text{ 万} \sim 60 \text{ 万 kW}\cdot\text{h}$ ，年节电费用在  $10 \text{ 万} \sim 50 \text{ 万元左右}$ ，投资回收期为  $1 \sim 2$  年。大功率设备投资为几十万元到百万元，年节电量在  $50 \text{ 万} \sim 100 \text{ 万 kW}\cdot\text{h}$ ，年节电费用在  $30 \text{ 万} \sim 80 \text{ 万元左右}$ ，投资回收期为  $1 \sim 2.5$  年。

## 8. 技术成果转化推广前景

传统电机调速传动技术中液力耦合器效率低、动密封易失效、变频器谐波干扰严重、环境适应性差，而永磁调速技术采

用非接触磁力传动，具有效率高、环境适应性强等优点，能够解决传统传动技术存在的问题。在国家节能环保战略要求下，永磁调速技术解决了国家重大核心工程装备调速传动的难题，市场空间可达上百亿元，具有较大的推广应用前景。

## （七十八）绿色节能敞开式立体卷铁心干式变压器设计技术

### 1. 技术名称

绿色节能敞开式立体卷铁心干式变压器设计技术

### 2. 适用范围

电压等级 6kVA ~ 35kVA，额定容量为 30kVA ~ 12500kVA 的三相双绕组立体卷铁心非包封干式电力变压器。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

铁心是变压器核心部件，其结构决定变压器的性能损耗和生产成本。该技术采用立体卷铁心结构。立体卷铁心是在平面卷铁心变压器技术基础上，将铁心的排列方式优化为立体等边三角形结构，使三相铁心磁路对称，磁路最短，磁阻减小，励磁电流、空载损耗、运行噪声显著降低，是一种使用传统材料通过技术改造获得的高效节能节材变压器核心部件。

#### 3.2 主要创新点

创新立体卷铁心结构，突破传统平面结构，由三个通过若干根梯形料带依次连续卷绕的铁心单框拼合而成，将三个心柱排列方式优化为立体等边三角形结构，三相铁心磁路是对称的，

磁路最短，磁阻减小。彻底改变了原来铁心的结构，是一种使用传统材料，但结构更合理、制造成本更低、性能优良、质量可靠的高效节能变压器铁心。

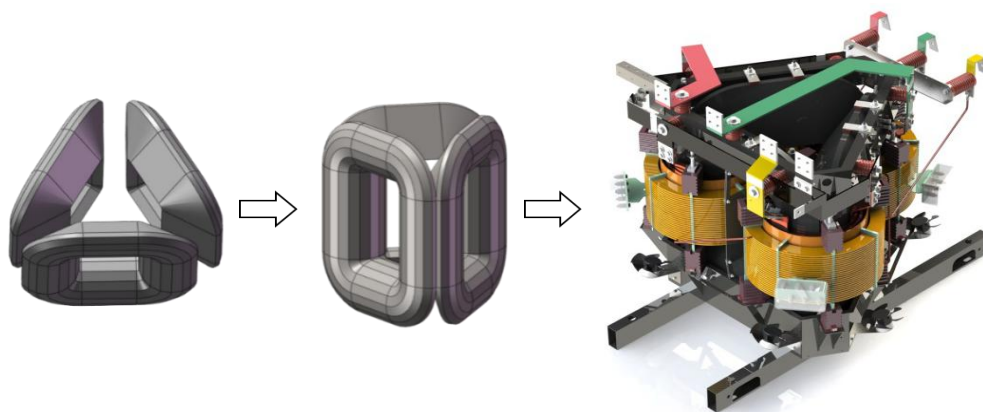


图 1 产品结构示意图

#### 4. 节能与温室气体减排效果

按平均容量 2500kVA 计算，空载损耗 1.96kW，负载损耗 16.264kW，空载电流 0.09%，与国家标准《干式电力变压器技术参数和要求》（GB/T 10228-2015）（空负载允许偏差取 8%）相比，每台每年可节约电量 43481kW·h，变压器的生命周期是 20 年，设有 2000 台产品运行二十年，总节电量为 173924 万 kW·h，折算标准煤 21.38 万 t，同时减少二氧化碳 99.19 万 t、二氧化硫 3.93 万 t。

#### 5. 技术示范情况

已在 12 个项目实现工程应用。例如伯恩光学有限公司，2021 年，投入使用一级能效绿色节能敞开式立体卷铁心干式变压器

SGB18-RL-2500/10-NX1 (18 台), 性能与国家标准《干式电力变压器技术参数和要求》(GB/T 10228-2015) (空负载允许偏差取 8%) 相比, 18 台 2500kVA 容量, 每年可节约电量 78.27 万 kW·h; 变压器的生命周期是 20 年, 运行 20 年, 总节电量为 1437.98 万 kW·h, 折算标准煤 1767.28t, 同时减少排放 8200.80t 二氧化碳、353.96t 二氧化硫。

## 6. 投资估算

按年产量 1200 台的规模, 基建投资 2000 万元, 设备及其他附属设备 (含安装费) 投资 800 万元, 无形资产投资 1000 万元; 项目建成后预计首年产量 400 台, 第二年 800 台, 第三年可达到计划产量 1200 台。通过产品价格分析, 项目生产规模为 1200 台/年, 达产后年销售收入为 36000 万元。

达产期时产品总成本 31385 万元, 其中固定成本 6035 万元, 包括新增工资福利费、修理费、折旧费、管理费用等; 可变成本 25350 万元, 包括主要原材料、燃料及动力费等。

## 7. 投资回收期

按年产量 1200 台/年的生产规模测算, 项目投资回收期约为 3.09 年 (税前含建设期); 项目投资回收期约为 3.74 年 (税后含建设期)。

## 8. 技术成果转化推广前景

该技术制造的产品经鉴定, 达到国际先进水平。具有替代传统叠片铁心变压器的技术性能和经济显著优势, 能引领带动

行业技术升级，提升变压器国际竞争力，增加出口创汇。该技术成熟、规范，已有国家标准《三相干式立体卷铁心配电变压器技术参数和要求》（GB/T 32825-2016）。产品符合国家政策、原材料供应充足。目前市场干式变压器主要分为树脂绝缘干式变压器和敞开式干式变压器，国内树脂绝缘干式变压器占比约90%左右，而敞开式干式变压器占比只有约10%左右，该技术预期有较大的推广空间。

### （七十九）新型大功率漫光灯

#### 1. 技术名称

新型大功率漫光灯

#### 2. 适用范围

体育场馆、机场、港口及市政光源能源节能改造。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

通过驱动高端电子镇流器将气体放电发光或固体（半导体）发光的电光源从50Hz的220V交流电，稳压到400V直流电，再转换成350V高频交流电（固体（半导体）发光的电光源稳压到400V~450V直流电），再经过高频转换变40KHz~50KHz的高频电压驱动光源。该技术克服了现代电子镇流器的技术复杂性，提升了电能转化率。经科学配光计算并设计了漫反射原理的特殊模型，制作出凹凸不平的反光器具。利用CFL以及发光二极管光源的发光特性使其均匀地照射在凹凸不平的反光材

料上，经二次互叠均匀的漫反射增加光效。使原优质的光源增强发光效率，提高 50%以上的照度而减少眩光。



图 1 500W 体育专用漫光灯

### 3.2 主要创新点

(1) 驱动电源的高端电子镇流器模块化技术。克服现代电子镇流器的技术复杂性，实现了数字和模拟技术的融合，确保系统的可靠性，实现故障管理，过电压（流）保护，自动冗余等功能，使工作电压处在 80V ~ 300V 而不受影响，功率因数达到 99.9%，解决了工作能耗高，并受电压不稳而影响寿命等关键问题。

(2) 二次漫反射增加光效技术。采用高镜面反光率达 99% 的特种纳米镀膜材料，经科学配光计算并设计了漫反射原理的特殊模型，制作出 360°凹凸不平的反光器具，增强发光效率，把背面光质反射利用，使其提高 50%以上的照度，光源经漫反射处理变成漫光源并解决眩光难题。

(3) 漫光灯光源技术。采用发光体（光源）的原材料的改进，增加发光光效，提纯三基色绿色粉（磷酸镧铈钕），红色粉

(氧化钇铕), 蓝色粉(铝酸钡镁铕), 实现高效发光, 解决了光效问题, 使裸灯光效最高达到 240 lm/W。

(4) 透明涂料技术创新, 采用化学氧化硅水溶剂作为光源部分稀土三基色荧光粉的涂层介质, 耐高温 1800°C, 硬度 9H+, 耐候、耐黄变, 能使 CFL 和二极管的光源发光体减缓光衰起到一定作用, 解决了光源光衰快的问题。

#### 4. 节能与温室气体减排效果

目前市政路灯、隧道灯, 高杆灯, 体育场馆专用灯在使用大功率钠灯和金卤灯, 属于高能耗光源, 工作时产生温度较高, 达到 200°C ~ 400°C, 电流大需要更多辅助耗材(使用电线平方大)。漫光灯技术可以替换钠灯和金卤灯, 节能 60%以上。一盏 100W 的漫光灯可以替代 250W 钠灯(金卤灯), 节约 150W, 每天工作 12h, 一年 365 天, 可节约 657kW·h, 减少排放二氧化碳 374.69kg, 年节能约 80.75kgce。

#### 5. 技术示范情况

(1) 深圳市体育馆运营管理有限公司体育中心节能改造项目, 体育场广告灯共有 320 个 400W 金卤泛光灯, 380 个 150W 钠灯路灯, 160 个 1000W 金卤泛光灯, 改造使用漫光灯 120W、70W、400W, 累计节约 35 万 kW·h, 年减少 199.61tCO<sub>2</sub>, 相当于年节约 43.02t 标准煤。

(2) 苍南 104 国道路灯和隧道使用漫光灯, 原有 400W 钠灯 1600 盏路灯、600 盏隧道灯改造为 160W 漫光灯, 年节能 294.34

万 kW·h，年减少 1678.6tCO<sub>2</sub>，相当于年节约 361.74t 标准煤。

## 6. 投资估算

以深圳市体育中心漫光灯全套设备新建工程为例，主要设备及其他附属设备一次投资 210 万元人民币，设备使用寿命 10 年，维护成本是投资的 0.5%，漫光灯技术寿命 12 年。

以投资苍南 104 国道漫光路灯和隧道灯全套设备新建工程为例，主要设备及其他附属设备一次投资 264 万元人民币，维护成本是投资的 0.5%，设备使用寿命 10 年，漫光灯技术寿命 12 年。

## 7. 投资回收期

苍南 104 国道漫光路灯和隧道灯全套设备新建工程年可节电 327.04 万 kW·h，按电费 0.6 元/kW·h 计算，可节约成本 196.22 万元，投资回收期一年五个月。

## 8. 技术成果转化推广前景

公共市政照明、行业照明对节能需求具有很大空间，目前特别需要高品质高技术含量的安全、健康、节能、环保的好光源以及灯具产品。漫光灯技术目前处在同类产品的领先地位，解决了所有光源的缺陷问题，市场趋向刚需态势，技术已经运营成熟，市场容量接近千亿元。

### （八十）锅炉燃烧智能监测与控制技术

#### 1. 技术名称

锅炉燃烧智能监测与控制技术

## 2. 适用范围

火力发电厂各容量燃煤锅炉的一次风粉在线监测、均衡分布的精细控制，尤其适用于复杂的煤质和运行负荷多变的情况。

## 3. 技术内容

### 3.1 技术原理

该技术采用先进的静电感应技术对锅炉一次风粉流动参数（煤粉流速、浓度和流量分配等）进行精确在线监测，通过新型的风粉调整技术实现风粉均匀分配的在线精细控制，最终对制粉精细调整以及燃烧配风优化。该技术可改善锅炉燃烧工况，减少总风量及一次风量，从而降低排烟损失，并降低辅机电耗；燃烧均匀后，可消除炉内燃烧恶化区域，从而减少飞灰含碳量，降低燃烧产生的  $\text{CO}$ ，达到高效低  $\text{NO}_x$  燃烧。

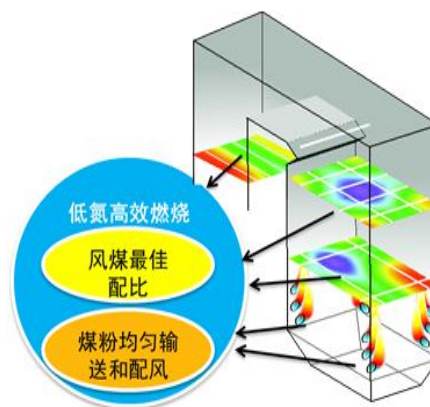
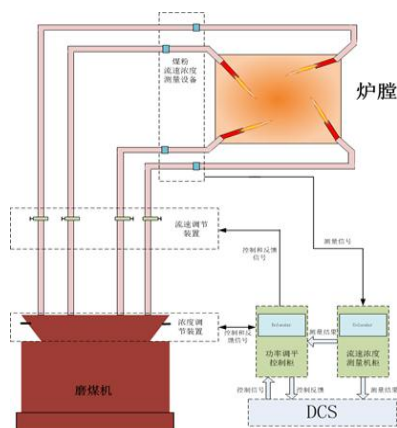


图1 锅炉燃烧智能检测与控制系统组装      图2 锅炉智能燃烧控制的效果

### 3.2 主要创新点

(1) 静电传感器采用与一次风管内径相同的环形设计，对风粉流动无任何扰动，无测量元件伸入管道内部，无磨损，使用寿命极高；多阵列式电极设计和多种数据处理算法有效结合，测量准确性高，稳定性强；仅靠感应煤粉自身携带的静电荷，无任何电信号或能量注入管道，被动式测量安全可靠。

(2) 新型风粉均衡调整装置，基于准确可靠的风粉在线监测数据，可对风粉分配的不均衡进行在线、精细控制，彻底改变了传统方式仅能依靠人工试验测量后离线手动调整可调缩孔的落后方式，具有不卡涩、不积粉、不增加管道额外阻力、调节线性度好、配备电动执行器灵活调节等优点，是制粉系统风粉分布精细控制的有效手段。

(3) 基于煤粉流速浓度的准确测量数据，通过自动计算和统计锅炉燃烧器出口风粉流动偏差，系统可对风粉偏差进行自动智能精细调节，实现各运行工况下燃烧器风粉分布均衡和输出功率的平衡。

### 4. 节能与温室气体减排效果

锅炉风粉准确监控和燃烧精细优化后，可提高锅炉热效率约 0.5%~1.0%，降低煤耗至少 1.5gce/kW·h 以上，NO<sub>x</sub> 排放量减少 10%，节省脱硝催化剂成本。从社会效益来看，按 2018 年全年火电发电量 49249 亿 kW·h，每发一度电节约 1.5g

标准煤计算，可节约 737 万 t 煤，减少 CO<sub>2</sub> 排放 1918 万 t，氮氧化物减排 10% 左右。对于煤炭资源的高效清洁利用、减少温室气体、减少环保成本方面具有重要的社会价值。

## 5. 技术示范情况

目前已经在全国约 50 台机组上得到应用，其中包含 600MW 机组 25 台，1000MW 机组 10 台。

该技术于 2015 年在国家电投平顶山发电分公司 1 号 1000MW 机组上成功应用，也是国内首台百万机组（对冲燃烧）上煤粉在线监测调平和优化的完整应用案例。该项目取得了良好的节能减排效果，风粉均衡性、燃烧恶化和 CO 排放等得到显著改善，锅炉效率提高 0.9%，降低煤耗 2.81gce/kW·h。

2017 年在国家能源集团谏壁电厂 13<sup>#</sup>机组（四角切圆燃烧）上得到成功应用，实施取得了显著节能减排效果，热负荷更加均匀，局部壁温超温有效改善，炉效提高 0.37%，NO<sub>x</sub> 降低 10% 以上。

2022 年在国家能源集团神华九江电厂深度调峰下锅炉燃烧器燃烧状态精细控制项目中应用。首次在 1000MW 超超临界对冲燃烧锅炉 30% 深调工况下实现了燃烧器燃烧状态精细控制技术的工程应用并获得了实践，验证了该套技术在锅炉长期低负荷运行工况下，提高稳燃性能，解决受热面壁温超温、壁温偏差大、减温水用量大、两侧减温水偏差大、NO<sub>x</sub>

排放增加等问题。

## 6. 投资估算

锅炉燃烧智能监测与控制技术，包含煤粉流速浓度在线监测技术、风粉均衡调整装置、自动均衡控制系统。以 600MW 燃煤机组为例，煤粉流速浓度监测系统硬件投入 280 万元（含实施），风粉均衡调整装置硬件投入 230 万元（含实施），均衡控制系统（燃烧优化软件）投入 120 万元（含实施），系统一次性投入约 630 万元；按年 4000 利用小时，年发电量 24 亿度分析，折算成本每千瓦投入 10.5 元。

系统投入后日常几乎不需人工维护，只需少量备品备件投入，几千到几万元不等，设备使用寿命在 10 年左右。

## 7. 投资回收期

以 600MW 燃煤机组为例，按年利用 4000h，年发电量 24 亿度分析，通过智能燃烧监测及控制技术，实现掺烧后的最优燃烧运行控制，比原有粗放的方式节省发电煤耗 1.5gce/度电，年节煤 3600t；减少 NO<sub>x</sub> 排放，年减少环保成本约 128 万元；降低厂用电率约 10%，年节约 80 万元；综合降低运行成本 424 万元/年，投资回收期在 2 年以内。

## 8. 技术成果转化推广前景

该技术采用阵列式静电感应煤粉流速浓度技术、新型煤粉均衡调平装置和先进的精细优化控制技术，可提供全方位的煤粉智能燃烧监测、均衡控制及燃烧精细化控制解决方案，

在国内外同行业处于领先地位。煤炭的高效清洁利用已经成为国家重要战略之一，我国煤电装机 300MW 以上机组约 2000 台，已实施精细化智能燃烧监测、控制及优化技术的机组占比不超 3%，所以该技术在国内外具有很大的市场容量和应用前景。

### （八十一）工业加热炉炉膛强化辐射传热技术

#### 1. 技术名称

工业加热炉炉膛强化辐射传热节能技术

#### 2. 适用范围

冶金行业的步进式、推钢式轧钢加热炉、冷轧生产线的热处理炉等，以及机械行业汽车制造厂、机械厂等企业制作钢制零件的正火、退火、淬火等工艺需要的各种热处理炉：箱式炉，台式炉；铸造厂的铸件退火炉；锻造加热炉等。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

热辐射体是根据传热学原理，采用高新技术材料制作而成，通过增加炉膛有效辐射面积、提高炉膛表面发射率和调控热射线方向定向辐射传热功能，达到节约燃气、降低碳排放的效果。节能元件先吸收炉气热量，在自身向外进行辐射传热过程中，使原来炉膛内部漫发射状的热射线具有了一定的方向性，使之更集中射向钢坯，增加了钢坯辐照度，提高了传热效率。

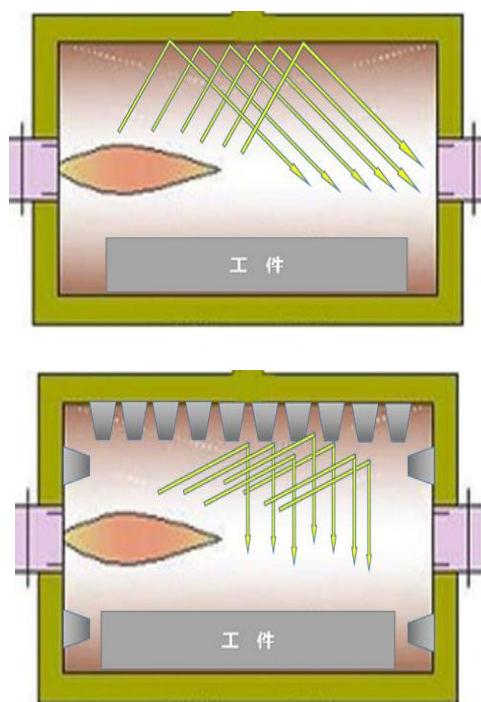


图 1 热射线方向调控示意

### 3.2 主要创新点

(1) 热辐射体元件能够同时提高炉壁发射率，增加炉壁有效辐射面积，增加热射线到位率，能够强化炉膛和工件之间的传热过程，提高炉子加热能力和产品加热质量，与同类技术相比节能效果好，使用寿命长。

(2) 不改变炉子原结构，节能元件采用特制专用高温胶泥与炉壁烧结一体，冷态时简单方法固定，工作温度上限 1450℃，牢固耐用。

### 4. 节能与温室气体减排效果

使用新型热辐射体节能率指标可以达到 8%~10% 甚至以上，项目寿命可达到 5 年以上。

以产能 160 万 t/a、吨钢煤气消耗 270m<sup>3</sup> 加热炉为例，采用强化热辐射节能技术改造后，节能率可达到 10.1%，年可产生节能效益 436.31 万元，节约标煤 4674.86tce，减少 12245.88tCO<sub>2</sub>。

## 5. 技术示范情况

国内很多钢厂均已采用了该技术，如宝钢、邯钢、唐钢、舞钢、安阳新普、潍坊特钢、后英钢铁、石横特钢等，可以达到降低燃料消耗、提高小时加热能力、降低氧化烧损的效果。

福建福欣特殊钢有限公司热轧卷板 2#加热炉强化热辐射节能改造项目，炉型为端进端出常规燃烧步进梁式加热炉（炉子有效长度：49.5m，内宽：12.7m，燃料为热值 8842kcal/m<sup>3</sup> 天然气，燃料单耗：41m<sup>3</sup>/t 钢）。

主要技改内容：在不改变炉子原结构的前提下，在炉顶、侧墙上加热安装辐射体，增大炉膛辐射换热面积，提高炉衬黑度，对炉衬和钢坯之间辐射传热角度进行改善调整，从而增强炉膛和钢坯之间的辐射传热，提高热量利用效率，取得降低燃料消耗的效果。按单炉年加热钢坯 75 万 t，每年节能效益 2090t 标煤。

## 6. 投资估算

该技术采用“合同能源管理”模式，按照节能验收指标，与客户按合同约定比例分享节能收益，可做到客户零投资，无风险。

## 7. 投资回收期

该技术投资回收期约 8~12 个月。

## 8. 技术成果转化推广前景

强化热辐射技术的节能效果明显，其安装实施具有短平快的特点，不需对原炉膛结构进行任何改动，在加热炉计划内停炉检修期间即可实施，不影响生产。更主要的是其节能原理不同于现有的加热炉节能技术，开辟了加热炉节能技术的新途径，在使用了热送热装、无头轧制、蓄热燃烧技术等基础上再节能 10% 以上。钢加工工序能耗 80% 以上用于加热工序，该技术有较大的推广潜力。

### （八十二）回转式冶炼废杂铜成套工艺及装备

#### 1. 技术名称

回转式冶炼废杂铜成套工艺及装备

#### 2. 适用范围

铜冶炼领域中废杂铜的火法冶炼回收，尤其适用于废杂铜炉料含铜大于 80% 的情况。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 技术原理

该技术通过高效熔体微搅动技术、侧开门大型回转式炉体新结构（NGL 炉）、节能减排新型供热技术、新型双功能炉门、高效净化烟气技术，原料适应范围更宽（入炉品位 85%~90%），较传统工艺能耗节省近 60%，氮氧化物排放量减少近 80%，自动化程度高，实现了废杂铜的高效节能环保冶炼。

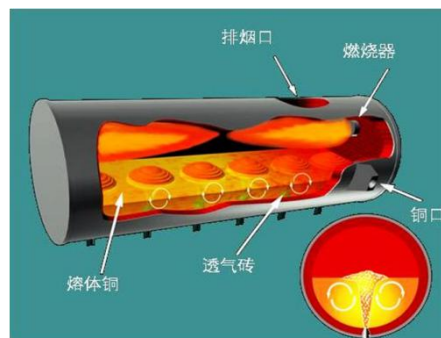
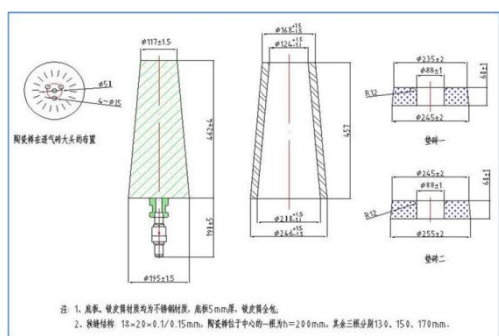


图 1 狭缝式透气砖构造示意

图 2 微气泡搅动熔体过程示意

### 3.2 主要创新点

(1) 首次在废杂铜精炼过程中采用氮气搅动。在炉底设置多个狭缝式耐火砖，通入氮气经过狭缝砖后，形成弥散性氮气微气泡群，在气泡群上浮的过程中，对熔体形成搅动作用。

(2) 首创废杂铜处理专用侧开门大型回转式炉体新结构，具有利用率高、内衬结构稳定、炉体密闭、操作环境和安全性好、自动化程度高、可处理冷料和热料、设备造价低等优点。

(3) 首次在废杂铜冶炼中采用“氧气卷吸燃烧”方式供热，既有富氧燃烧节能、减排的特点，又有供热均匀、无高温热点、不降低炉内衬使用寿命的特点。

(4) 采用新型双功能炉门结构，在加料门下沿设置一条排渣流道，通过控制炉体角度位置，达到可满足加料和排渣的操作要求，将两种功能巧妙合并，可减少一个专用排渣口，炉体结构进一步简化，排渣作业将更加便利和快捷，大大减轻劳动

强度。

(5) 设置了烟气二次燃烧室、喷水冷却塔以及布袋除尘器。二次燃烧室有足够的燃烧空间,以保证可燃物焚烧温度在  $850^{\circ}\text{C}$  以上,喷水冷却使烟气骤冷降温至  $350^{\circ}\text{C}$  以下,最大限度地消除了产生有毒物质的可能性。布袋除尘使废气最后得到净化排空。

#### 4. 节能与温室气体减排效果

NGL 炉的平均综合能耗为  $80 \sim 100\text{kgce/t}$  铜,比倾动炉节约能耗  $23\% \sim 38\%$ ,比反射炉节约能耗  $41\% \sim 53\%$ 。NGL 炉的吨铜排烟量为  $32\text{m}^3/(\text{t 阳极铜} \cdot \text{h})$ ,比倾动炉减排  $57\%$ ,比反射炉减排  $76\%$ ,节能减排效果显著。

#### 5. 技术示范情况

NGL 炉冶炼废杂铜成套技术和装备已经在国内 4 家大型再生铜企业进行工业化应用,至今先后已有 7 台(套) NGL 投入运行和生产。自 2012 年 8 月 7 日起,世界上首台 NGL 炉在广西有色再生金属有限公司(梧州)投入运行。2012 年 12 月,山东金升有色集团有限公司再生铜厂的 NGL 投入生产。2018 年 6 月,中铝东南铜业有限公司 NGL 炉点火投产。2020 年 9 月,宁波金田铜业有限公司 NGL 炉点火投产。

山东金升应用技术指标如下:废杂铜炉料含铜  $85\% \sim 88\%$ ; NGL 炉产能  $263.7\text{t-a.Cu/炉}$ ;炉膛内径  $3.32\text{m}$ ;炉膛内长  $11.5\text{m}$ ;天然气单耗(总)  $40.44\text{m}^3/\text{t-a.Cu}$ ;氧气单耗  $122.08\text{m}^3/\text{t-a.Cu}$ ;直收率  $87.0\%$ 。

## 6. 投资估算

年处理 20 万 t 废杂铜 NGL 系统投资估算如下：项目投资 24.59 亿元，其中固定资产投资 12.13 亿元。

## 7. 投资回收期

投资回收年限（税后）为 8.79 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

目前，随着社会的高速发展，铜资源报废量和社会蓄积量将会持续增加，且未来将会保持这种增长趋势。以 2020 年为例，全球精铜消费量在 2307 万 t，而利用废杂铜冶炼的精铜产量仅 376 万 t，蓄积 1900 多万 t 铜未得到有效回收；其中，中国精铜消费量达到 1198 万 t，利用废杂铜冶炼的精铜产量仅 277 万 t，蓄积 921 万 t 未得到有效回收。在精炼铜消费量持续增长的情况下，再生铜必将成为未来中国以及世界铜供给的主要来源，而环保、低碳、节能的再生铜处理技术也必将越来越需重视。NGL 炉成套工艺和装备在再生铜处理方面优势明显，既可以作为现有企业技术改造的可选方案，也可以作为新建项目的首要选择。具有广阔的推广前景。

### （八十三）钢铁厂烧结机主烟道内置式余热锅炉

#### 1. 技术名称

钢铁厂烧结机主烟道内置式余热锅炉

#### 2. 适用范围

钢铁冶炼领域，该技术对烧结系统的影响很小，但考虑烧

结运行工况复杂，需要烧结主抽风机有 600Pa ~ 1000Pa 的余压来满足整体设计需要。另主烟道烟温在 150℃以上才有余热利用价值。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

烧结主烟道余热回收主要回收烧结机生产过程中产生的高温废气的余热，在主烟道中布置相应的锅炉换热面，通过余热锅炉换热面实现工质与烟气的换热，产生过热蒸汽，以提供生产使用，并达到烟道降温的目的。该技术通过对整体流场的分析，选取合理的烟气流速，管排间距，设置的内置式余热锅炉基本上不会对系统阻力造成影响。

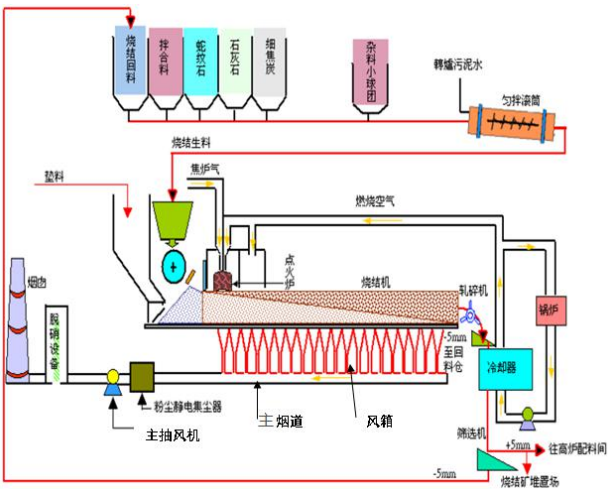


图 1 烧结工艺流程图

#### 3.2 主要创新点

(1) 采用内置式主烟道余热锅炉，在不影响系统阻力和烧

结矿质量的前提下，合理利用主烟道内高温废气的热量，产生过热蒸汽，可以用于其他工艺用汽，也可以用于发电，同时降低了主烟道排烟温度，达到了节能降耗的目的。与外置式锅炉相比，内置式余热锅炉能源实现高质高用，梯级利用且设备少，维修维护简单。

(2) 过热器采用低流速鳍片耐磨管设计，蒸发器及省煤器采用热管式结构，从结构上避免了漏水事故的发生，运行安全可靠。

#### 4. 节能与温室气体减排效果

以柳州钢铁公司 1#360m<sup>2</sup>烧结机主烟道内置式余热锅炉为例：该余热锅炉利用 350℃左右的高温烟气，将 40℃的给水加热，产生 1.9MPa、310℃的过热蒸汽，蒸汽流量 12t/h，可节省标煤 880kg/h。目前烧结机主烟道常规不进行余热回收利用，高温废气直接排入大气。采用主烟道内置式余热锅炉，可以有效利用热废气能量，同时可以降低排烟温度。

#### 5. 技术示范情况

已有 4 项工程应用示范。如广西柳钢中金不锈钢有限公司镍铁冶炼项目烧结系统余热利用工程、防城港钢铁基地项目（一期）烧结球团系统烧结余热余能综合利用工程项目等。其中柳州钢铁集团有限公司 1#电站烟风系统技术改造项目，工程规模为 1#360m<sup>2</sup>烧结，南北大烟道内置式余热锅炉及辅机，自 2015 年建设完毕至今，余热锅炉蒸发量 12t/h，每小时节省标煤约

880kg。年运行时间 7000h，年节约标煤量约 6160t。

## 6. 投资估算

因国内各厂家烧结能力及烧结工艺，以及设备磨损情况不同，根据不同工况，烧结机主烟道余热锅炉设备总体投资在 600 万~1200 万元之间。运行维护包括除盐水 15t/h，变频给水泵 1 开 1 备，单台功率 22kW，日常其他照明功率 2kW，加上人工费、设备折旧费（按 10 年核算，5%/年）、大修费用约 150 万元左右。

## 7. 投资回收期

柳钢 1<sup>#</sup>360m<sup>2</sup> 烧结大烟道余热回收项目，投资回收期约 1.2 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

目前，全国钢铁企业 1400 余家，可以安装主烟道余热锅炉的企业约 700 家左右。其中，已经安装主烟道余热锅炉的占 30% 左右，其中主要为主烟道外置式余热锅炉，安装内置式主烟道余热锅炉的市场普及率仅占 8% 左右。烧结主烟道余热回收系统有较大的市场推广前景。

### （八十四）低阶煤蓄热式下行床快速热解工艺

#### 1. 技术名称

低阶煤蓄热式下行床快速热解工艺

#### 2. 适用范围

煤炭加工、热电联产行业对挥发分较高的低阶煤（以褐煤和低变质烟煤为主）热解清洁高效转化利用。

### 3. 技术内容

#### 3.1 技术原理

采用核心加热元件蓄热式辐射管与下行床相耦合，形成蓄热式下行床快速热解反应器，炉内无转动设备，系统运行可靠；炉内错落布置的辐射管可实现物料的强混合快速传热，在 6s ~ 9s 内实现 6mm 以下中低阶粉煤的快速热解；炉内温度场在 500℃ ~ 950℃ 范围可灵活调控，油、气品质高，挥发分提取率、能源转化效率及系统热效率高；采用模块化组合工艺，易于工程放大，单台热解炉规模可达 120 万 t/a；针对火力发电，可提高锅炉效率，降低发电煤耗。

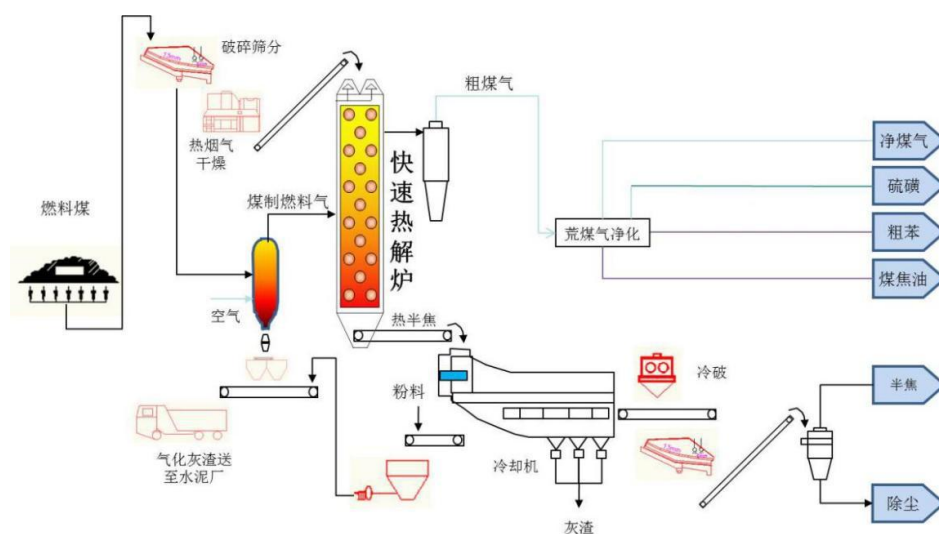


图 1 粉煤快速热解耦合火力发电新工艺

#### 3.2 主要创新点

(1) “低阶煤蓄热式下行床快速热解工艺”采用蓄热式燃

烧一辐射管加热技术，处理 6mm 以下低阶粉煤，解决了传统外热式热解工艺处理规模小及内热式热解工艺流程复杂的难题，同时因没有转动机械，系统运行可靠性高；烟气系统与高温热解油气系统隔离，有利于热解产品的冷却及分离回收，热解气及热解焦油品质高；蓄热式辐射管可利用廉价的低热值燃料气做燃料，燃烧烟气的排烟温度可低至 150℃，燃烧系统热效率大于 93%，快速热解炉热效率达 88%以上；采用模块化组合工艺，已完成百万吨级工艺数据包，设计的快速热解炉整体布置紧凑，占地面积小。

(2) 蓄热式下行床快速热解炉温度场在 500℃~950℃范围可调，煤种适应范围广，油气品质高，产率可灵活调整，能量转化效率达 82%以上。

#### 4. 节能与温室气体减排效果

(1) 与传统的焦化工艺对比：以单系列 120 万 t/a 的内蒙古赤峰大板项目为例，快速热解综合能耗为 90.69kgce/t，低于现有钢铁企业和独立焦化企业或新建/扩建焦炭生产设备的综合能耗值。较新建焦炭生产设备综合能耗 91.5 kgce/t，采用蓄热式下行床快速热解工艺，可每年节约 972t 标煤，相当于减排二氧化碳 2390t。

(2) 传统的火力发电工艺对比：以江西江能神雾萍乡煤电油多联产项目为例进行测算比较，该项目的建设规模为 2×100 万 t 快速热解耦合 2×660MW 煤粉锅炉，锅炉燃料采用 45%的热

解半焦+55%萍乡原煤，锅炉燃烧混合燃料后锅炉效率提升了0.75%（粗略计算可降低供电煤耗 2.34g，以 2016 年全国供电煤耗 312g/kW·h 估算），若进一步考虑高温热半焦的显热回收，热解半焦平均热送温度按 400℃计算，则可降低供电煤耗 2.66g/kW·h，合计降低供电煤耗 5g 标煤/kW·h。以年利用 5500h 算，则每年可节约标煤 34485t 标煤，相当于减排二氧化碳 84795t，碳交易收益为 486.81 万元。中低阶煤经热解提质后，高温提质煤可作为锅炉清洁燃料替代动力煤直接进锅炉燃烧，经济效益和环境效益显著。

## 5. 技术示范情况

内蒙古巴林右旗煤炭分质梯级利用 70 万 t/a 乙二醇项目，位于内蒙古赤峰市巴林右旗大板工业园区。工程规模：3×120 万 t/a 煤炭快速热解装置，2×750t/d 水焦浆气化装置，70 万 t/a 乙二醇装置，同时建设 4×670t/h 循环流化床锅炉+3×60MW 背压式汽轮发电机组动力站，以及项目配套公用工程及辅助设施、储运设施、环保设施、生产设施及厂前区等。

## 6. 投资估算

以单系列 120 万 t/a 的内蒙古赤峰大板项目为例，测算其关键设备的投资为 1.58 亿元，运行维护费用 3.5 万元/年。

## 7. 投资回收期

以单系列 120 万 t/a 的内蒙古赤峰大板项目的低阶煤蓄热式下行床快速热解为例，项目的总投资 55956 万元，财务内部收

益率税后为 14.37%，项目投资所得税后净现值为 6188 万元，借款偿还期为 4.41 年（不含建设期），静态投资回收期为 5.83 年（不含建设期），总投资收益率为 12.42%，项目的盈利能力满足行业要求，项目具有较好的经济效益。

## 8. 技术成果转化推广前景

当前，我国 90%以上的低阶煤用作发电、工业锅炉和民用燃料直接燃烧，由此引发一系列严重的生态和环境污染问题，且浪费了低阶煤中蕴藏的油、气和化学品资源。粉煤热解耦合发电多联产技术路线，可实现低阶煤资源的最大化利用，是实现低阶煤分级分质清洁高效利用的重要途径。

### （八十五）含烃石化尾气的膜法梯级耦合分离和综合利用技术

#### 1. 技术名称

含烃石化尾气的膜法梯级耦合分离和综合利用技术

#### 2. 适用范围

石油化工、油气工程、精细化工等领域；工艺副产、有组织排放的含烃石化尾气，非爆炸性混合体系，具备石化常规公用工程支撑，主要回收氢气和可凝性组分；规模不限，可嵌入上下游工艺，也可独立运行。

#### 3. 技术内容

##### 3.1 基本原理

建立连续超薄涂层工艺生产兼具高通量和高选择性的有机

气体分离膜和膜分离器，以自主开发的非理想分离状态模型实现精确过程设计，以自主开发的梯级耦合流程设计方法将膜分离、吸附、深冷等气体分离技术优化整合，协同强化，实现含烃石化尾气的高收率、高纯度综合回收和减排。主要优势包括：综合回收能耗显著降低，回收产品纯度高，操作弹性大，可处理多源、复杂组分废气。膜法梯级耦合分离技术可实现能源的梯级利用和资源的梯级回收，打破单一技术发展瓶颈，达到提高产品回收率、减少排放量、降低回收能耗的多重目标。



图 1 多源含烃石化尾气梯级耦合分离工艺示范装置

### 3.2 技术创新性

（1）提出基于三角坐标—矢量分析的多技术耦合拓扑结构设计策略，建立以膜为核心，吸附、冷凝等多技术优势互补的梯级耦合路线，充分利用分离过程“双向富集”效应，降低能耗，提高收率，成功解决多来源、多组分原料多目标回收的难题。

(2)含烃石化尾气的高价值资源综合回收率可达到 95%以上，氢气产品纯度可超过 99%，轻烃产品纯度符合各种产品的质量要求。

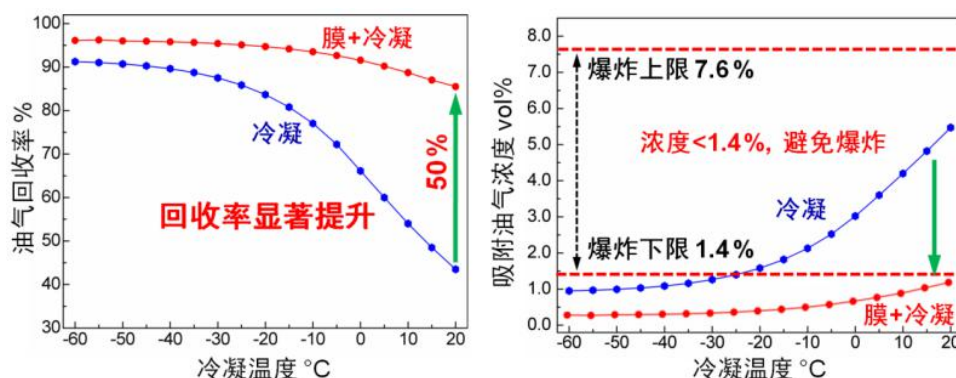


图 2 含烃石化尾气的多技术耦合循环级联回收优势

#### 4. 节能与温室气体减排效果

对典型多源含烃石化尾气，资源综合回收率可达到 95%以上，综合回收单耗小于  $0.10 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$  尾气，对于有组织排放的含烃石化尾气，通过回收最高可减少 VOCs 排放约 99.5%。与传统路线相比，单耗降低约 30%；与国外同类型的串联组合技术相比，单耗降低 20%~30%。

以千万吨级炼化企业建设综合型膜法耦合分离装置为例，每年可回收约 1.67 亿标方氢气，折合减排二氧化碳约 7.5 万 t，回收轻烃、石脑油约 10 万 t，折合减排二氧化碳约 3 万 t（氢气当燃料，减排当量为  $0.95\text{kg}/\text{m}^3$ ，制氢的排放当量为  $1.40 \text{ kg}/\text{m}^3$ ；轻烃、石脑油作为化工原料的减排系数为 0.20）。

## 5. 技术示范情况

氢回收型膜法梯级耦合分离技术，在中石油大连石化、辽阳石化、辽河石化等企业建成并稳定运行。

大连某石化厂，2014 年开始运行，规模  $83000\text{m}^3/\text{h}$ ，年效益  $> 3.28$  亿元，兼具高收率 ( $> 92.0\%$ )、高纯度 ( $> 99.0\%$ ) 和低单耗 ( $< 0.5\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ )，每年可减排二氧化碳 15.7 万 t。

辽阳某石化炼油厂，2018 年开始运行，规模  $40000\text{m}^3/\text{h}$ ，年效益  $> 9000$  万元，每年可减排二氧化碳 7.6 万 t。

辽阳某石化芳烃厂，2019 年开始运行，规模  $18000\text{m}^3/\text{h}$ ，年效益  $> 3000$  万元， $0.2\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$  超低能耗，每年可减排二氧化碳 6.8 万 t。

辽河某石化，2019 年开始运行，规模  $10000\text{m}^3/\text{h}$ ，年效益  $> 2400$  万元，每年可减排二氧化碳 4.8 万 t。

## 6. 投资估算

氢回收型膜法梯级耦合分离装置，配套千万吨炼油规模的设备投资约 5000 万元（其他规模炼厂可以按比例折算），装置寿命 15~20 年，氢气分离膜组件寿命 5~10 年。

综合回收型膜法梯级耦合分离装置，配套千万吨炼油规模的设备投资约 1.5 亿元（其他规模炼厂可以按比例折算），装置寿命 15~20 年，氢气分离膜组件寿命 5~10 年，有机蒸汽膜组件 3~5 年。

VOCs 减排型膜法梯级耦合分离装置，配套  $1000\text{m}^3/\text{h}$  有组

织排放尾气规模的设备投资约 800 万元，装置寿命 15~20 年，有机蒸汽膜组件 3~5 年。

## 7. 投资回收期

氢回收型膜法梯级耦合分离装置，投资回收期不超过 0.8 年。  
综合回收型膜法梯级耦合分离装置，投资回收期不超过 1.0 年。

VOCs 回收减排型膜法梯级耦合分离装置，投资回收期需根据有组织排放尾气中回收物的丰度和价值，一般在 2~3 年。

## 8. 技术成果转化推广前景

氢气是炼化企业仅次于原油的第二成本，因此氢回收型膜法梯级耦合分离装置必将是炼化企业降低炼油成本的标配装置，目前在中石油和中石化下属炼油企业已经有较好的推广，未来地方炼化和民营企业将是推广的重点。轻烃也是重要的化工原料，但是含烃石化尾气往往需要作为整个炼化厂的燃料，因此，综合回收型膜法梯级耦合分离装置的推广需结合企业自身的燃料供应情况，对于燃料气富余或者有替代源的企业，可以大力推广。

VOCs 减排是石化行业可持续发展过程中必须解决的问题，膜法梯级耦合分离装置在减排的同时最大限度地回收高价值组分，因此，该类型装置也有望成为石化及其他企业的标配装置。按照目前国内的炼油总量，如果 80% 的炼油产能配套氢回收型或者综合回收型膜法梯级耦合分离装置，年可实现二氧化碳减排 400 万 t 以上。