

《国家工业节能降碳技术应用指南与案例（2024年版）》之十二：工业降碳技术

（一）燃煤锅炉烟气碳捕集协同污染物深度治理技术

1. 技术适用范围

适用于燃煤锅炉二氧化碳捕集利用。

2. 技术原理及工艺

依托清华大学开发的第二代低能耗碳捕集先进技术，进行技术集成与工艺优化。吸收剂采用双向分离有机胺溶剂进行碳捕集，解吸塔结合催化材料促进液相二氧化碳的解吸速率，具有碳捕集效率高、系统安全可靠等优点。技术路线如图1所示。

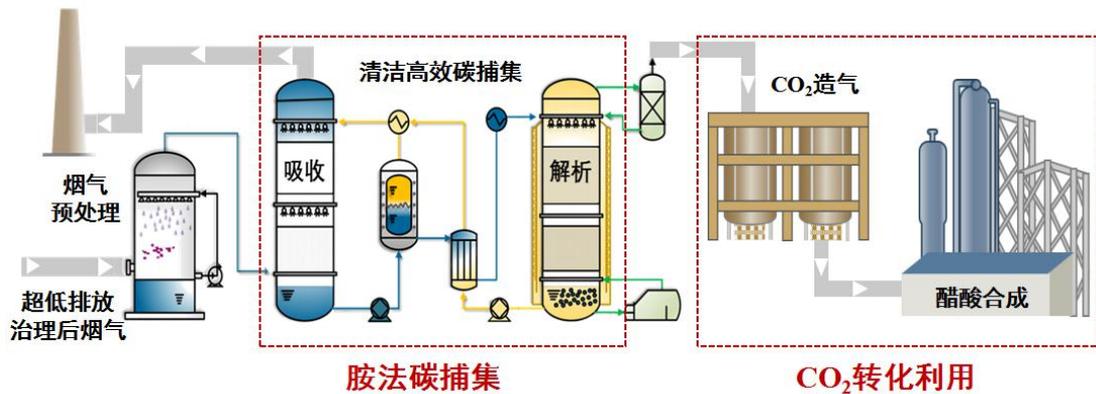


图1 技术路线图

3. 技术功能特性及指标

（1）复合胺-物理溶剂-水三元两相碳捕集吸收剂，碳捕集效率 > 90%；

（2）有机物逃逸控制力强，碳捕集后烟气中二氧化硫、颗粒物排放浓度 < 3 毫克/立方米。

4.应用案例

(1) 项目基本情况:

技术提供单位为河北建滔能源发展有限公司，应用单位为河北建滔能源发展有限公司。改造前燃煤锅炉未建设碳捕集系统，二氧化碳直接排空，主要耗能种类为煤炭，燃煤锅炉出力 150 吨/小时，燃煤烟气量 12 万立方米/小时。

(2) 主要技术改造内容:

锅炉系统安装烟气预处理塔、二氧化碳吸收塔、二氧化碳解吸塔、多级水洗塔、液液分相器、高效换热器、解吸二氧化碳处理装置以及吸收剂净化设备。2022 年 2 月实施节能改造，实施周期 1 年。

(3) 节能降碳效果及投资回收期:

改造完成后，碳捕集能力达 20 万吨/年，消减掉系统自身耗能的碳排放，实现二氧化碳减排量 13.7 万吨/年。投资额为 1.95 亿元，投资回收期为 5 年。

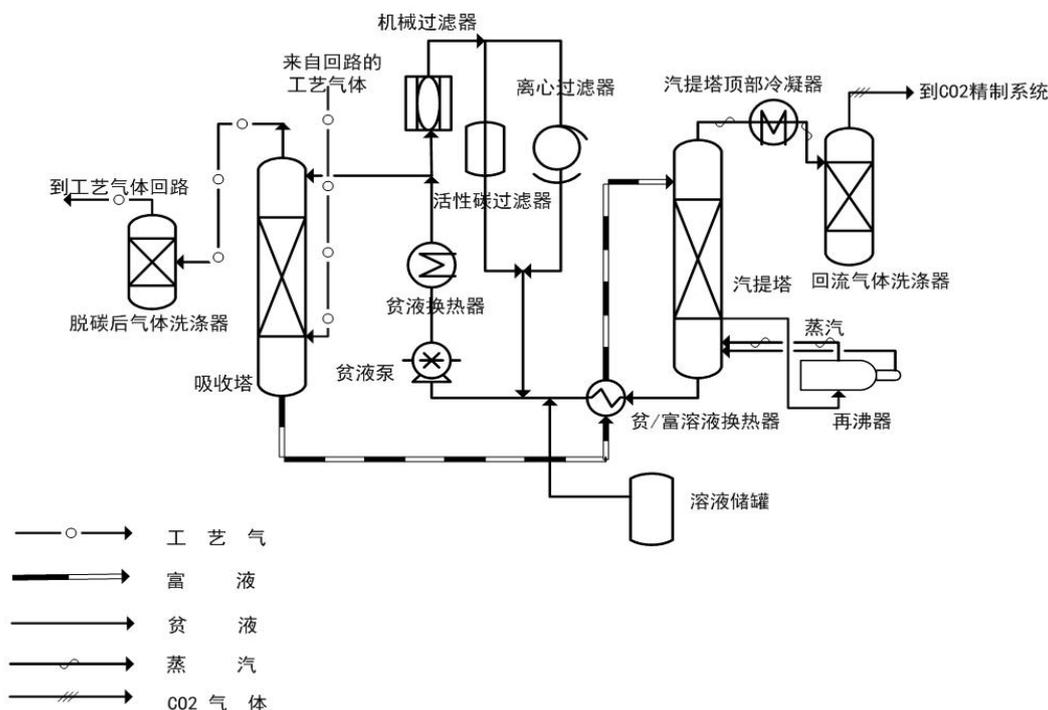
(二) 氢冶金炉顶气二氧化碳脱除技术

1. 技术适用范围

适用于冶金行业工艺气体脱碳处理。

2. 技术原理及工艺

利用 N-甲基二乙醇胺溶液可选择性与二氧化碳形成不稳定碳酸盐的特性，对炉顶气中的低浓度二氧化碳进行低温吸收、高温解吸，进入下道二氧化碳精制单元，得到工业级与食品级二氧化碳产品，最终实现炉顶气脱碳循环与二氧化碳回收利用。工艺流程如图 2 所示。



3. 技术功能特性及指标

二氧化碳脱除工艺与直接还原工序相结合，脱碳后气体中二氧化碳含量 $\leq 1\%$ 。

4. 应用案例

(1) 项目基本情况:

技术提供单位为河钢集团有限公司，应用单位为张宣科技氢冶金公司。改造前冶金工艺流程无二氧化碳脱除单元，含二氧化碳工艺气直接排空，工艺气排放量为 75 吨/小时。

(2) 主要技术改造内容:

冶金工序增设二氧化碳脱除单元，安装吸收塔、汽提塔、脱碳后洗涤器、贫富液换热器等装置。2021 年 5 月实施建设，实施周期 1 年。

(3) 节能降碳效果及投资回收期:

改造完成后，二氧化碳吸收量为 11.4 吨/小时，年用电量为 215 万千瓦时，消减掉系统自身耗能的碳排放，实现二氧化碳减排量 8.9 万吨/年。投资额为 2000 万元，投资回收期为 4.5 年。

(三) 工业废气二氧化碳捕集矿化制备负碳板材关键技术

1. 技术适用范围

适用于工业废气二氧化碳利用。

2. 技术原理及工艺

采用常温矿化固结技术，模拟自然界岩石生成过程，优化设计工艺参数，利用含硅、钙成分的材料，在催化剂作用下加速与工业烟气中的二氧化碳发生矿化反应，生成具有负碳属性的建材产品（负碳石材、粉料、骨料等），代替天然石材，有效减少山石开采，直接利用高浓度工业尾气。工艺流程如图 3 所示。

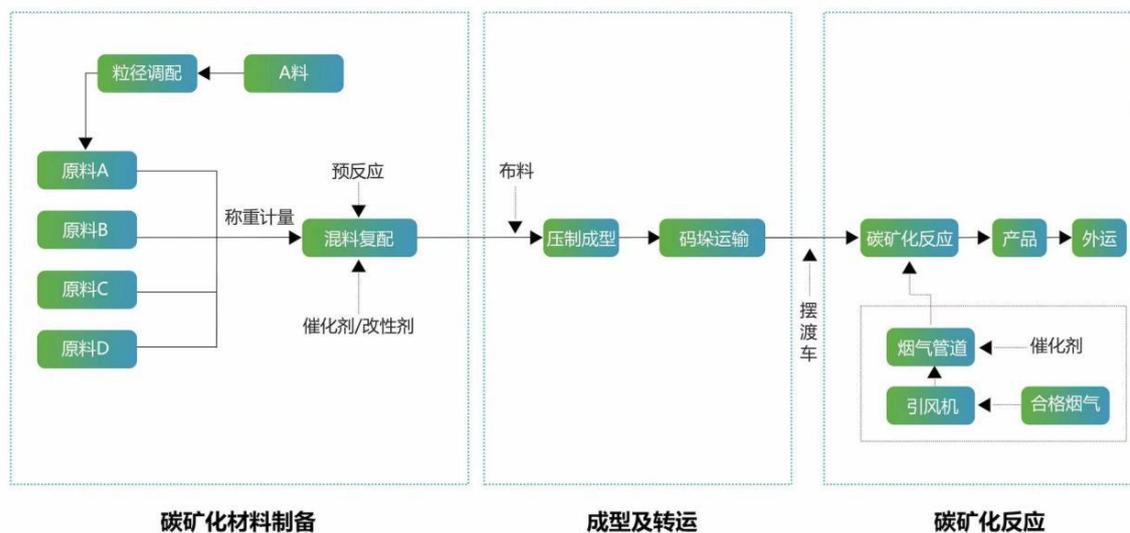


图3 工艺流程图

3. 技术功能特性及指标

(1) 工业固废与化工废气协同制备负碳建材，单位质量建材固碳量约 0.2 吨/吨；

(2) 工艺参数优化设计，可直接利用二氧化碳浓度 $\geq 10\%$ 的化工废气。

4.应用案例

(1) 项目基本情况:

技术提供单位为山东京韵泰博负碳科技有限公司，应用单位为山东京博控股集团有限公司恒丰分公司。该项目为新建项目，设计年产负碳板材产品 25 万吨，主要能耗种类为电力，年耗电量为 750 万千瓦时，主要消耗原材料为外排工业废气和钢渣，年消耗工业废气（二氧化碳浓度 10%~15%）5 万吨、年消耗钢渣 20 万吨。

(2) 主要技术改造内容:

安装混料罐、碳化反应器、压机、坯体输送设备等 32 台（套）关键设备。2022 年 6 月实施建设，实施周期 1.5 年。

(3) 节能降碳效果及投资回收期:

建设完成后，单位产品可固化二氧化碳 200 千克/吨，消减掉系统自身耗能的碳排放，实现二氧化碳减排量 4.4 万吨/年。投资额为 4480 万元，投资回收期为 4.5 年。

(四) 合成氨二氧化碳资源化综合利用技术

1. 技术适用范围

适用于煤化工合成氨工艺。

2. 技术原理及工艺

通过优化合成氨低温甲醇洗装置工艺指标，提升装置吸收及解吸能力，提高精制二氧化碳产量。使用低温甲醇洗尾气作为航天炉输煤气体和用于生产纯碱，提高纯碱产能，替换出的精制二氧化碳用于生产尿素。通过优化调整醋酸厂净化装置变压吸附工艺，提升二氧化碳产品气纯度，回收后直接作为制气装置气化剂，减少外购二氧化碳，降低原料成本。装备结构如图 4 所示。

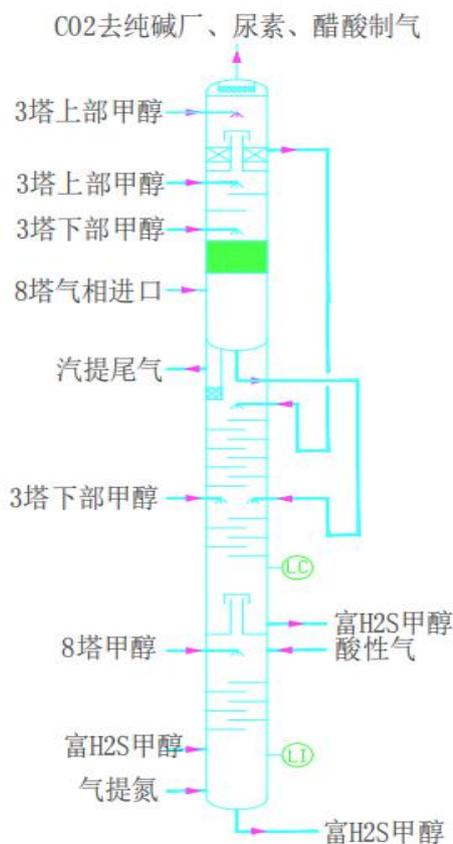


图4 装备结构图

3.技术功能特性及指标

(1) 合成氨低温甲醇洗工艺提升，酸性气二氧化碳回收量增加 6000~9000 立方米/小时；

(2) 净化装置变压吸附，二氧化碳产品气纯度提升至 95%。

4.应用案例

(1) 项目基本情况：

技术提供单位为河南骏化发展股份有限公司，应用单位为河南骏化发展股份有限公司和河南顺达新能源科技有限公司。改造前低浓度二氧化碳尾气直接放空未循环利用，同时由于原材料二氧化碳不足，年生产纯碱 60 万吨，尿素生产装置未开工，设计产能 30 万吨/年。

(2) 主要技术改造内容：

优化合成氨低温甲醇洗装置工艺指标，改造炉气管线和压缩机，将变压吸附抽空三阀和抽空六阀更换为三偏心蝶阀，航天炉改用低温甲醇洗尾气进行输煤。2022 年 3 月实施节能改造，实施周期 9 个月。

(3) 节能降碳效果及投资回收期：

改造完成后，回收利用二氧化碳 62.4 万吨/年，消减掉系统自身耗能的碳排放，实现二氧化碳减排量 38.5 万吨/年。投资额为 80 万元，投资回收期为 2 个月。

(五) 低能耗烟气二氧化碳捕集技术及装备

1. 技术适用范围

适用于工业烟道气碳捕集。

2. 技术原理及工艺

采用化学吸收工艺，烟气经预处理后进入吸收塔，与吸收剂反应完成二氧化碳的吸收，吸收后烟气从吸收塔顶排出。吸收剂经换热升温进入再生塔，加热解吸出二氧化碳，吸收剂经换热冷却再次进入吸收塔，进行循环吸收。从再生塔顶部出来的二氧化碳经冷却、气液分离、压缩干燥、液化后进入储罐贮存，完成整个捕集流程。工艺流程如图 5 所示。

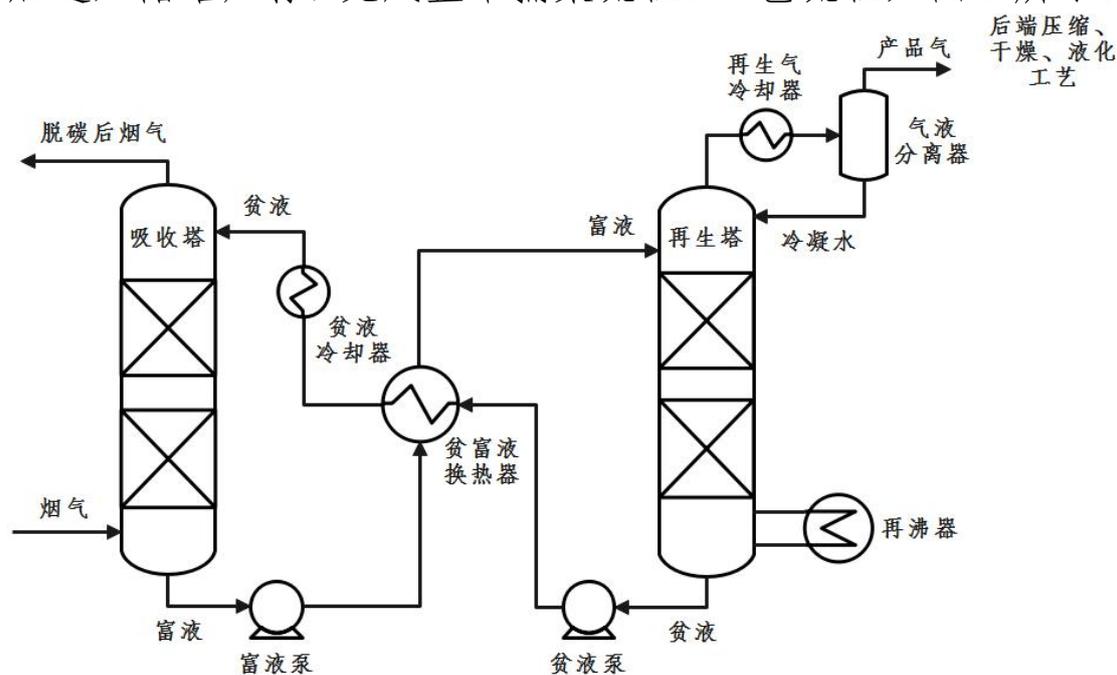


图5 工艺流程图

3. 技术功能特性及指标

(1) 新型混合胺吸收剂，二氧化碳捕集效率 $\geq 90\%$ ，产品二氧化碳纯度 $\geq 99.9\%$ ；

(2) 采用化学吸收剂法，碳捕集再生热耗 ≤ 2.4 吉焦/吨，吸收剂损耗 ≤ 0.8 千克/吨。

4.应用案例

(1) 项目基本情况:

技术提供单位为国家电投集团远达环保工程有限公司，应用单位为上海长兴岛热电有限责任公司。改造前燃煤机组二氧化碳直接排放未被利用，主要耗能种类为煤炭，锅炉容量 21 兆瓦，排放量约 26 万吨/年。

(2) 主要技术改造内容:

新建吸收塔、再生塔、换热器、后端压缩机、干燥器、制冷液化器、二氧化碳储罐等设备。2022 年 6 月实施建设，实施周期 9 个月。

(3) 节能降碳效果及投资回收期:

改造完成后，年可捕集二氧化碳 7 万吨，消减掉系统自身耗能的碳排放，实现二氧化碳减排量 5.8 万吨/年。投资额为 8775.95 万元，投资回收期为 8 年。

(六) 二氧化碳封存增压泵利用关键技术

1. 技术适用范围

适用于石油化工有限公司高压常温二氧化碳输送增压装置。

2. 技术原理及工艺

采用高效抗气蚀关键部件动态优化技术对二氧化碳封存增压泵进行高效水力结构设计。基于耐低温自润滑性关键零部件制造技术研制加工工装和工艺路线，利用多参数状态监控与运行状态辨识技术开发试验样机，根据样机试验参数调整关键部件几何结构和工作参数，有效解决二氧化碳管线输送增压泵工作稳定性差、效率低、汽蚀性能差等问题。设备结构如图 6 所示。

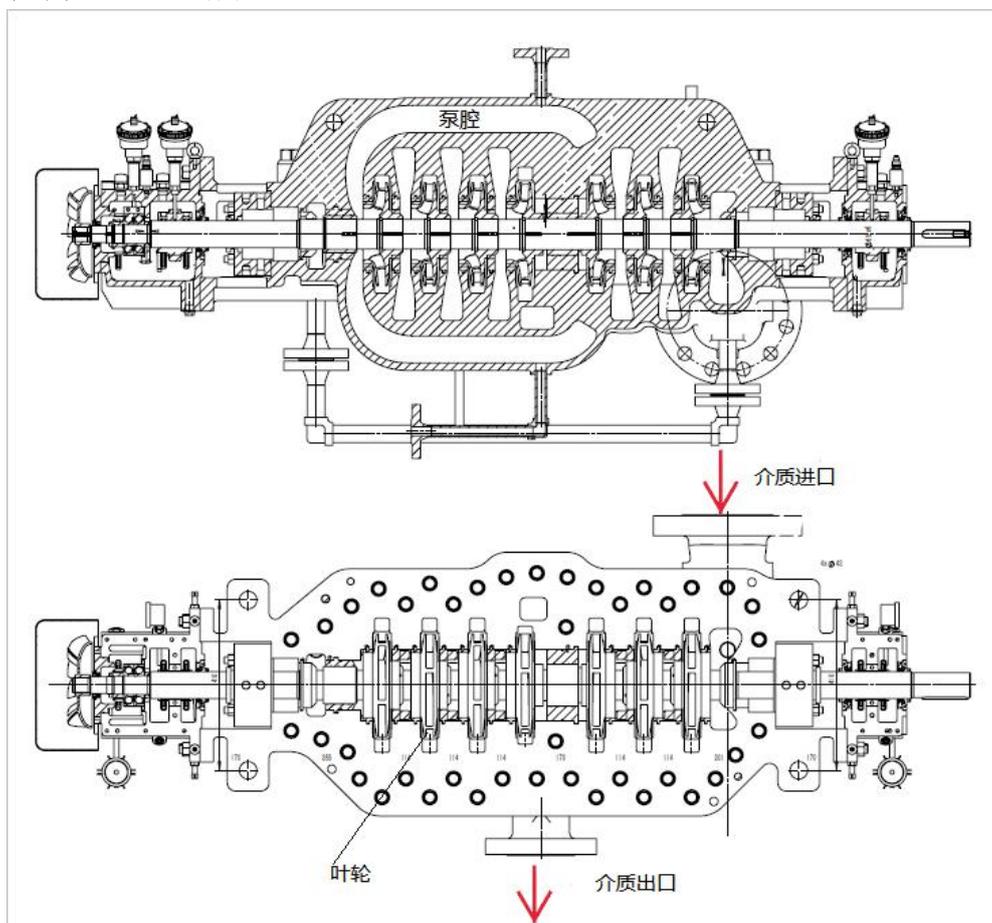


图6 设备结构图

3.技术功能特性及指标

(1) 叶轮水力优化设计，整机额定效率达 72%，效率提升 2%~3%；

(2) 低温易汽化工况分体式自润滑摩擦副结构，整机工作温度-30~-20℃。

4.应用案例

(1) 项目基本情况：

技术提供单位为烟台龙港泵业股份有限公司，应用单位为中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司。改造前用槽车公路运输二氧化碳，主要耗能种类为天然气，每年车辆运输 6 万辆次，使用天然气约 300 万立方米。

(2) 主要技术改造内容：

安装二氧化碳管道输送增压泵，配套安装现场运行监控系统及泵组冲洗系统。2022 年 9 月实施节能改造，实施周期 1 年。

(3) 节能降碳效果及投资回收期：

改造完成后，节约天然气 200 万立方米/年，实现节能量 2429 吨标准煤/年，二氧化碳减排量 6460 吨/年。投资额为 1672 万元，投资回收期为 2.6 年。

(七) 撬装智能二氧化碳驱油装备及驱油工艺技术

1. 技术适用范围

适用于石油行业碳捕集利用。

2. 技术原理及工艺

采用新型多缸活塞二氧化碳注入泵，利用超临界二氧化碳对原油有降粘、膨胀等作用的特性，将气态或液态二氧化碳注入地下油藏层，使剩余原油体积大幅膨胀脱离地层水，降低原油黏度、增大其流动性，提升原油采出率。气体二氧化碳可通过回气管路返回储罐，液态二氧化碳注入地下，实现二氧化碳埋存。系统采用自动化控制，实现驱油开采和二氧化碳埋存智能化运行管理。设备结构如图 7 所示。

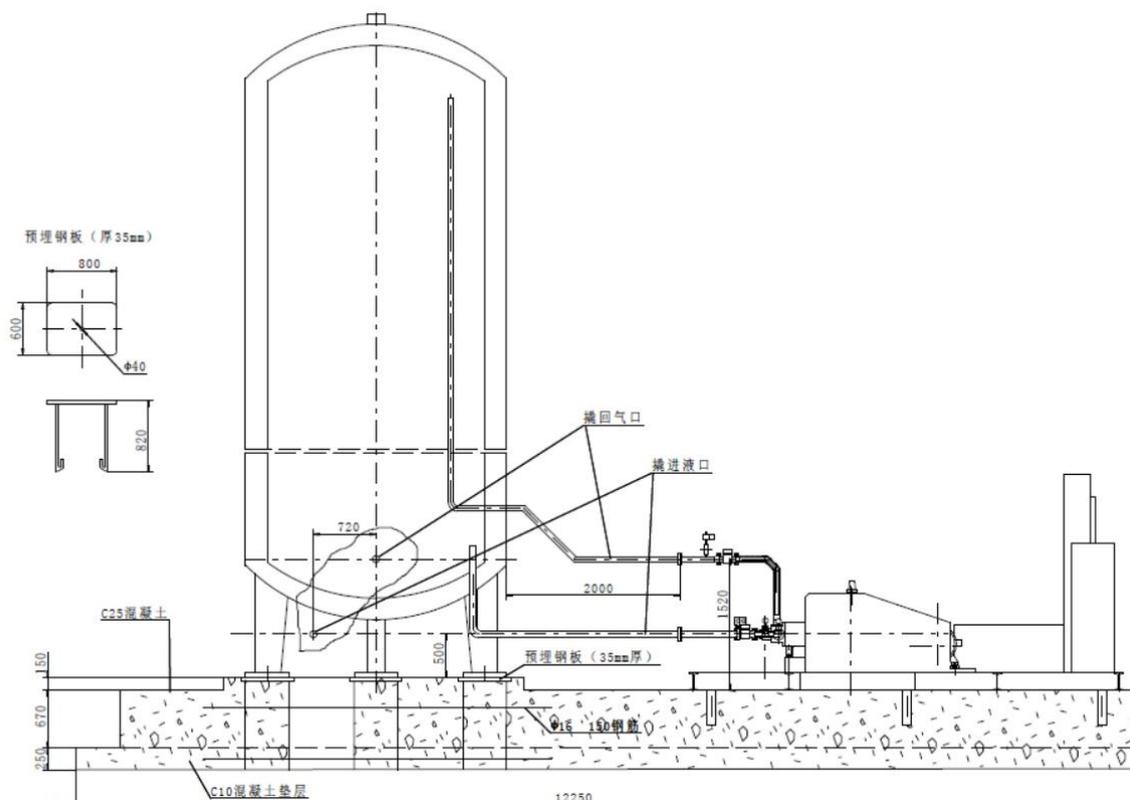


图7 设备结构图

3.技术功能特性及指标

(1) 多缸活塞式二氧化碳注入泵，流量大、压力高，工作效率 > 90%；

(2) 二氧化碳气液分离，驱油管路预冷，关键设备使用寿命延长 5 年。

4.应用案例

(1) 项目基本情况：

技术提供单位为博山水泵制造厂，应用单位为中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司。该项目为新建项目，将齐鲁石化捕集的二氧化碳，注入胜利油田地下油层进行驱油并就地封存，主要耗能种类为电力，设计规模为二氧化碳注入量 100 万吨/年，单台设备二氧化碳注入量为 8 吨/小时，耗电量为 1671.12 万千瓦时/年。

(2) 主要技术改造内容：

建设 10 座无人值守注气站，安装 22 套二氧化碳注入驱油装置。2022 年 6 月实施建设，实施周期 10 个月。

(3) 节能降碳效果及投资回收期：

建设完成后，单台设备二氧化碳埋存量为 5.76 万吨/年，消减掉系统自身耗能的碳排放，实现二氧化碳减排量 125.3 万吨/年。投资额为 1160 万元，投资回收期为 3 年。

(八) 生物质锅炉富氧燃烧制绿碳技术

1. 技术适用范围

适用于生物质炉排锅炉。

2. 技术原理及工艺

采用生物质锅炉富氧燃烧模块和碳捕集模块改造烟风系统，通过设置烟气再循环旁路烟道，将引风机出口烟气回引至送风口，以氧气/二氧化碳气体代替空气实现富氧燃烧，获得高浓度二氧化碳原料烟气。针对高浓度二氧化碳原料烟气开发碳捕集提纯技术，原料烟气依次通过预处理、变压吸附提纯、烟气压缩、变温吸附干燥、液化、精馏，最终获得二氧化碳产品。工艺流程如图 8 所示。

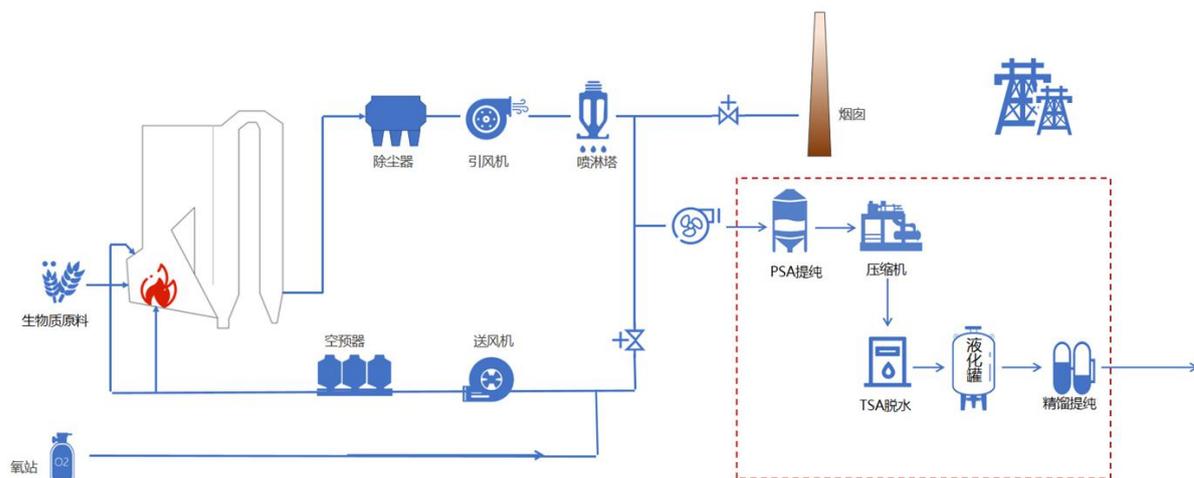


图8 工艺流程图

3. 技术功能特性及指标

(1) 锅炉富氧燃烧，效率提高 $\geq 1\%$ ，送引风机功耗下降 20%；

(2) 富氧燃烧与碳捕集结合，碳捕集率 $\geq 85\%$ ，二氧化碳纯度 $\geq 99\%$ 。

4. 应用案例

该技术为研发类技术，暂无应用案例。技术提供单位为上海发电设备成套设计研究院有限责任公司。

(九) 电解二氧化碳制合成气技术

1. 技术适用范围

适用于电解二氧化碳制合成气工艺。

2. 技术原理及工艺

采用二氧化碳电解反应槽，以二氧化碳气体和电解液中的水为原料，在电能的作用下，二氧化碳和水在电解反应器阴极催化剂作用下接受电子转化为合成气。电解液中的水在电解反应器阳极催化剂作用下释放出电子分解为氧气。整个转化过程仅有二氧化碳和水参与消耗，电解质运行无损耗，可以将工业行业二氧化碳浓度在 10%~100%之间的烟气转化为合成气进一步使用。技术原理如图 9 所示。

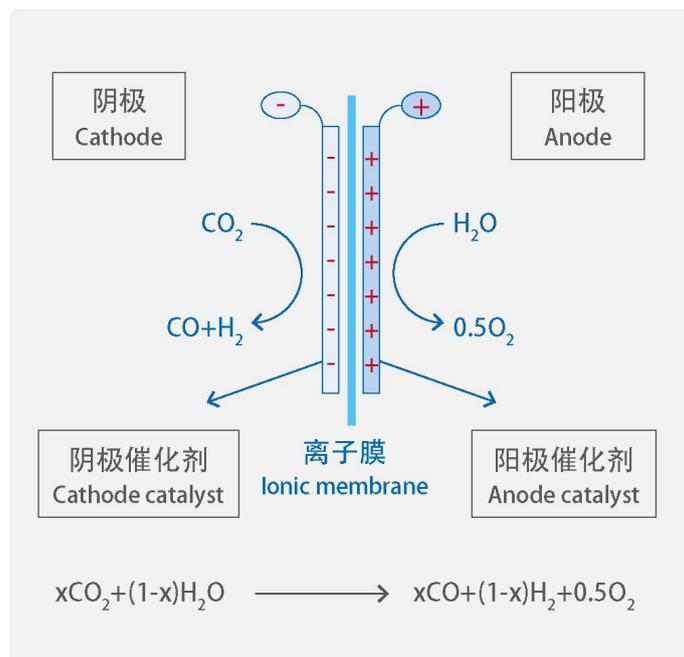


图 9 技术原理图

3. 技术功能特性及指标

新能源电解二氧化碳制合成气，每立方米合成气减少二氧化碳排放 1.84 千克。

4. 应用案例

(1) 项目基本情况:

技术提供单位为碳能科技（北京）有限公司，应用单位为内蒙古伊泰化工有限责任公司。该项目为新建项目，项目设计规模为 4.6 万标立方米合成气/年，主要耗能种类为风电，主要消耗原料为二氧化碳，单位体积合成气耗电量为 6.5 千瓦时/标立方米。

(2) 主要技术改造内容:

建设一套百吨级电解二氧化碳制合成气装置，包括电化学反应器、磁力循环泵、气液分离罐等。2019 年 9 月实施建设，实施周期 1 年。

(3) 节能降碳效果及投资回收期:

建设完成后，单位体积合成气消耗二氧化碳 0.67 千克/标立方米，实现二氧化碳减排量 30.8 吨/年。投资额为 90 万元，投资回收期为 10 年。

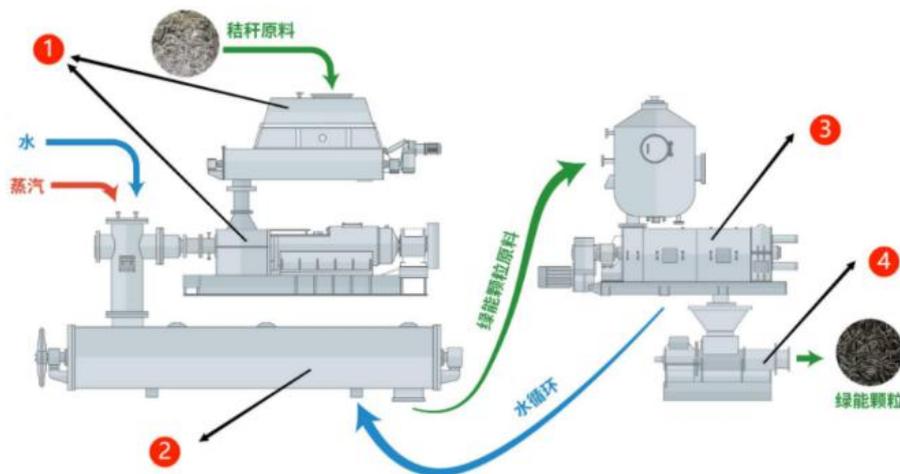
(十) 生物质绿能颗粒制备技术

1. 技术适用范围

适用于化石燃料替代。

2. 技术原理及工艺

采用自主研发的可移动式生物质连续高温水洗炭化技术，生物质在一定温度压力作用下实现半纤维素热解，改善疏水特性，降低纤维韧性易于研磨，提高能量密度和含碳率，从而将生物质原料转化为高热值、疏水易存储、离子含量可控的类煤化零碳燃料。生产装置采用模块化设计，水洗反应时间根据燃料品质需求可调，解决生物质原料体积大、密度低和炉具适应性差等问题。工艺流程如图 10 所示。



1-输送系统；2-反应系统；3-干化系统；4-成型系统

图10 工艺流程图

3. 技术功能特性及指标

(1) 生物质废弃物直接转为类煤化疏水颗粒燃料，热值 4000 大卡/千克，密度 1.5 吨/立方米；

(2) 移动式模块化设计，单条产线基础产能 5000 吨/年。

4. 应用案例

该技术为研发类技术，暂无应用案例。技术提供单位为上海发电设备成套设计研究院有限责任公司。

(十一) 钢铁工业尾气生物发酵制乙醇技术

1. 技术适用范围

适用于钢铁等行业含一氧化碳工业气体利用。

2. 技术原理及工艺

以工业转炉煤气（主要成分为一氧化碳）为原料，通过微生物发酵，将一氧化碳转化为乙醇、乙酸等代谢产物，再利用蒸馏塔提取发酵液中的乙醇。提取乙醇后的含菌液经离心机分离菌体蛋白，清液经厌氧反应器除去大部分化学需氧量（COD）后进入后续脱氮除磷系统，达标排放，发酵尾气进一步分离未完全反应的一氧化碳后排放，同时副产 1 兆帕饱和蒸气。该技术发酵效率高，工艺流程短，可实现无机碳到有机碳的转化及固定。工艺流程如图 11 所示。



图11 工艺流程图

3. 技术功能特性及指标

(1) 无氢气参与下实现一氧化碳转化，发酵过程一氧化碳转化率 $\geq 80\%$;

(2) 连续发酵保证乙醇浓度稳定，发酵液乙醇浓度 \geq 45 克/升。

4. 应用案例

(1) 项目基本情况:

技术提供单位为河北首朗新能源科技有限公司，应用单位为河北首朗新能源科技有限公司。该项目为新建项目，采用工业转炉煤气生物发酵制乙醇，主要耗能种类为电，主要消耗原料为转炉煤气，设计生产乙醇 4.5 万吨/年，消耗转炉煤气 3.67 亿立方米/年，单位产品电耗为 2500 千瓦时/吨。

(2) 主要技术改造内容:

建设工业转炉煤气生物发酵制乙醇装置，包括气体处理工段、发酵工段、蒸馏工段、辅料和 CIP 工段、成品罐区、饲料工段、污水工段及辅助装置。2016 年 8 月实施建设，实施周期 2 年。

(3) 节能降碳效果及投资回收期:

建设完成后，生产每吨乙醇对比转炉煤气燃烧发电可减少二氧化碳 1.985 吨，实现二氧化碳减排量 8.9 万吨/年。投资额为 4.17 亿元，投资回收期为 5.27 年。

(十二) 生活垃圾提取塑料剩余物制备清洁能源燃料技术

1. 技术适用范围

适用于生活垃圾制备清洁燃料。

2. 技术原理及工艺

采用高压微电子技术，使塑料带电分离。收集生活垃圾中的废弃塑料，通过清洗分拣设备对不同种类塑料进行缩融塑料颗粒清洗分选，将塑料低温裂解液化，聚合生成新塑料。提取塑料后的剩余垃圾通过生物法干化除臭、粉碎、固化成型、无害化陈化反应及生物菌群分解催化制备清洁能源燃料，减少环境污染。工艺流程如图 12 所示。

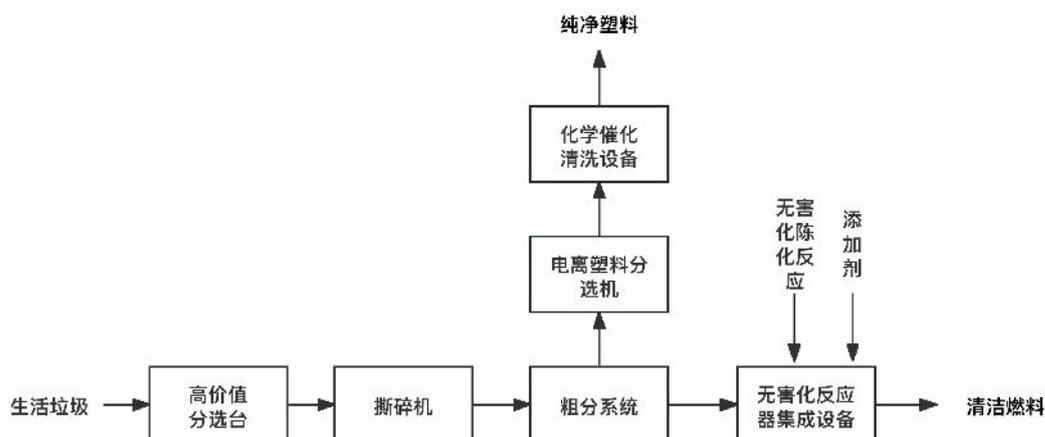


图12 工艺流程图

3. 技术功能特性及指标

(1) 生活垃圾废弃塑料充分回收利用，塑料提取率达 95%，塑料洁净率达 99.9%；

(2) 成品清洁燃料可长期储存，燃料热值 ≥ 3500 大卡/千克。

4.应用案例

(1) 项目基本情况:

技术提供单位为北京绿安创华环保科技有限公司，应用单位为北京富杰伟业环保工程技术有限公司。改造前生活垃圾焚烧处理无回收利用，日处理生活垃圾 100 吨，单位垃圾焚烧产生二氧化碳 1 吨/吨。

(2) 主要技术改造内容:

新建回收系统，增设微电子提取塑料设备、化学催化清洗设备及无害化反应器集成设备，回收制备再生塑料和清洁燃料。2023 年 8 月实施建设，实施周期 8 个月。

(3) 节能降碳效果及投资回收期:

改造完成后，废弃塑料回收率为 95%，单位垃圾二氧化碳排放量降低至 0.0234 吨/吨，实现二氧化碳减排量 3.52 万吨/年。投资额为 2000 万元，投资回收期为 1 年。