



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 118867321 A

(43) 申请公布日 2024. 10. 29

(21) 申请号 202411322286.5

(22) 申请日 2024.09.23

(71) 申请人 江苏赛纯科技有限公司

地址 226000 江苏省南通市海门区包场镇
发展大道2057号

(72) 发明人 廖云龙 吕伟文

(74) 专利代理机构 南京众创睿智知识产权代理
事务所(普通合伙) 32470

专利代理师 门雪晴

(51) Int. Cl.

H01M 8/1011 (2016.01)

H01M 8/0662 (2016.01)

H01M 8/0668 (2016.01)

H01M 8/04029 (2016.01)

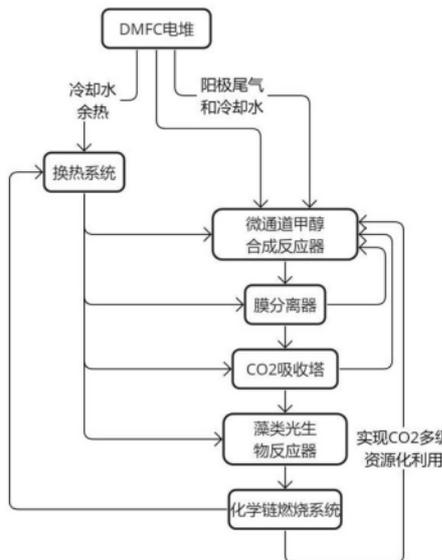
权利要求书2页 说明书12页 附图3页

(54) 发明名称

一种具有尾气处理功能的甲醇燃料电池系
统

(57) 摘要

本发明涉及应用于燃料电池技术领域的一
种具有尾气处理功能的甲醇燃料电池系
统,包括DMFC电堆、微通道甲醇合成反应器、膜分离器、
CO₂吸收塔、藻类光生物反应器、化学链燃烧系统和
换热系统,系统以DMFC阳极尾气为原料,经合
成、分离、吸收、固定、循环等过程实现CO₂的多级
资源化利用,并通过多级换热网络将DMFC电堆余
热梯级利用于CO₂资源化单元,该系统集成了CO₂
加氢合成甲醇、膜分离富集、化学吸收、藻类光合
固定、化学链燃烧捕集等多种CCU技术路线,并实
现了与DMFC热源的耦合,在提高碳资源利用效率
的同时显著降低了系统能耗,本系统实现了DMFC
近零排放和能量梯级利用。



1. 一种具有尾气处理功能的甲醇燃料电池系统,其特征在于:包括换热系统和依次连接的DMFC电堆、微通道甲醇合成反应器、膜分离器、CO₂吸收塔、藻类光生物反应器和化学链燃烧系统,所述DMFC电堆的阳极尾气和冷却水分别与微通道甲醇合成反应器的进口连接,经微通道甲醇合成、膜分离、CO₂吸收、藻类固碳和化学链燃烧过程实现CO₂的多级资源化利用;所述换热系统将DMFC电堆的冷却水余热分别与微通道甲醇合成反应器、膜分离器、CO₂吸收塔和藻类光生物反应器连接,实现反应热、分离热、吸收热、培养热等热能的梯级利用。

2. 根据权利要求1所述的一种具有尾气处理功能的甲醇燃料电池系统,其特征在于:所述DMFC电堆采用对称板式结构,包括阳极板、阴极板、质子交换膜、集流体和端板;所述阳极板和阴极板上分别设有引入反应物和排出产物的流道。

3. 根据权利要求1所述的一种具有尾气处理功能的甲醇燃料电池系统,其特征在于:所述微通道甲醇合成反应器采用板式多层装配结构,由内置催化剂涂层的微通道反应板和进出口集流板通过密封垫片堆叠而成;所述催化剂涂层负载Cu基活性组分;所述微通道反应板上加工有尺寸在毫米至微米量级的矩形微通道;所述进出口集流板分别与DMFC阳极尾气出口和甲醇合成产物出口连接,并设置有加热装置,控制反应器在最佳温度下运行。

4. 根据权利要求1所述的一种具有尾气处理功能的甲醇燃料电池系统,其特征在于:所述膜分离器采用中空纤维膜或管式膜等非对称结构的分离膜组件,CO₂优先渗透至膜的低压侧实现富集,渗透侧保持真空或低压状态;未渗透的组分在高压侧形成CO₂贫气体,排至下一级单元;所述膜分离器进料来自微通道甲醇合成反应器的产物气,出料分别送至CO₂吸收塔和藻类光生物反应器。

5. 根据权利要求1所述的一种具有尾气处理功能的甲醇燃料电池系统,其特征在于:所述CO₂吸收塔为填料塔结构,塔内填充高比表面积的规整填料和CO₂吸收剂,所述填料材质选用耐腐蚀、高强度的金属或陶瓷材料;所述CO₂吸收剂选用醇胺类、氨类或碱类溶液;所述CO₂吸收塔采用逆流操作,塔底入口连接膜分离器的CO₂富气,塔顶喷淋入口连接换热系统的热媒,吸收剂在填料表面与CO₂充分接触,实现CO₂的化学吸收;吸收产物经再生塔加热再生,实现吸收剂循环利用和CO₂的释放。

6. 根据权利要求1所述的一种具有尾气处理功能的甲醇燃料电池系统,其特征在于:所述藻类光生物反应器采用管式或板式结构,由透明材料制成,藻种为生长速率快、CO₂利用率高的微藻品种;所述藻类光生物反应器配有补水和收集装置,所述藻类光生物反应器的进料为CO₂吸收塔排出的CO₂贫气和膜分离器渗透侧的CO₂贫气,经藻类光合固碳作用实现CO₂的生物转化。

7. 根据权利要求1所述的一种具有尾气处理功能的甲醇燃料电池系统,其特征在于:所述化学链燃烧系统包括流化床燃烧反应器和还原反应器,并配有循环回路和气固分离装置;所述流化床燃烧反应器采用金属氧化物作为载氧体;所述载氧体在燃烧反应器中与来自藻类光生物反应器的CO₂贫气接触,生成碳酸盐;还原反应在还原反应器内进行,碳酸盐在还原剂如H₂气氛中被还原,生成CO₂气体和再生的载氧体;所述气固分离装置对燃烧和还原产物进行分离,实现CO₂的富集和载氧体的循环。

8. 根据权利要求1所述的一种具有尾气处理功能的甲醇燃料电池系统,其特征在于:所述换热系统采用多级换热网络,包括板式换热器、管壳式换热器;所述DMFC电堆的高温冷却水通过换热系统与微通道甲醇合成反应器、膜分离器、CO₂吸收塔分别进行热量交换;所述

换热系统的低温冷却水与藻类光生物反应器进行热量交换,为藻类培养提供热量;所述换热系统还可回收化学链燃烧系统的高温烟气余热。

9.根据权利要求1所述的一种具有尾气处理功能的甲醇燃料电池系统,其特征在于:还包括基于工业以太网的分布式控制系统,由现场总线、PLC、人机界面和上位机组成;对各单元的温度、压力、流量、液位、pH值、气体组成等参数进行实时采集和反馈控制。

10.根据权利要求1-9任一项所述的一种具有尾气处理功能的甲醇燃料电池系统的使用方法,其特征在于:包括以下步骤:

S1、DMFC电堆在阳极和阴极分别发生甲醇氧化和氧还原反应,产生 CO_2 、 H_2 和电能,并释放反应热,通过冷却水带出;

S2、DMFC阳极尾气和冷却水分别进入微通道甲醇合成反应器,在催化剂作用下, CO_2 和 H_2 发生甲醇合成反应,冷却水放出热量维持反应器温度;

S3、甲醇合成产物气进入膜分离器, CO_2 在压差作用下优先渗透,实现 CO_2 的富集和提纯, H_2 则在高压侧排出;

S4、富 CO_2 气体进入 CO_2 吸收塔,与塔顶喷淋的吸收剂逆流接触,在填料表面发生化学吸收反应, CO_2 被捕集;吸收热由冷却水提供;

S5、 CO_2 吸收塔顶部排出的 CO_2 贫气和膜分离器渗透侧的 CO_2 贫气一同进入藻类光生物反应器,在光照条件下,藻类通过光合作用将 CO_2 转化为有机物和 O_2 ,藻类培养热由冷却水提供;

S6、藻类光合固碳后的 CO_2 贫气进入化学链燃烧系统,与流化床内的金属氧化物载氧体接触,发生燃烧反应, CO_2 被捕集;还原反应将碳酸盐还原,释放 CO_2 ,燃烧放出的热量可用于发电;

S7、换热系统在各资源化单元之间实现DMFC电堆冷却水热量的梯级利用;控制系统根据生产需求,调节各单元的运行参数,优化物料和能量的分配。

一种具有尾气处理功能的甲醇燃料电池系统

技术领域

[0001] 本发明涉及的具有尾气处理功能的甲醇燃料电池系统,特别是涉及应用于燃料电池技术领域的一种具有尾气处理功能的甲醇燃料电池系统。

背景技术

[0002] DMFC因其高能量密度、低污染等优点在分布式发电、移动电源等领域具有广阔应用前景。但DMFC阳极尾气含大量CO₂,直接排放将加剧温室效应。因此,开发高效的DMFC尾气资源化利用技术,对于实现DMFC的绿色可持续发展至关重要。

[0003] 中国专利CN114432795B公开了一种DMFC尾气的气液分离器,通过分离组件将尾气中液态水分离回收利用,避免浪费和水箱污染。但该装置仅实现了水的回收利用,未涉及CO₂的资源化途径,难以实现DMFC的碳中和运行。

[0004] 中国专利CN114447373B公开了一种DMFC气液分离器的去水机构,通过螺旋片、干燥剂等实现尾气的气液分离和深度除湿。但同样未涉及分离后CO₂的利用问题,无法有效降低DMFC的碳排放。

[0005] 上述专利聚焦于DMFC尾气的除水处理,在一定程度上提高了水资源的利用效率,但对于尾气中CO₂这一关键组分的减排与资源化利用考虑不足。而CO₂是DMFC碳排放的最主要贡献者,若不能对其进行高效资源化利用,将难以真正实现DMFC系统的碳中和和可持续发展。

[0006] 此外,DMFC电堆在发电过程中会释放大量低品位废热,若能与CO₂资源化过程耦合,不仅可显著提升系统的能源利用效率,还可降低CO₂资源化的能耗,但现有专利对此鲜有涉及。

[0007] 因此,亟需开发一种集成CO₂资源化与废热回收利用的DMFC系统,在提高碳资源利用效率的同时,最大限度地回收利用DMFC废热,以期实现DMFC的低碳、高效、可持续运行。

发明内容

[0008] 针对上述现有技术,本发明要解决的技术问题是如何实现DMFC阳极尾气中CO₂的高效资源化利用,并通过余热回收提升系统能效。

[0009] 为解决上述问题,本发明提供了一种具有尾气处理功能的甲醇燃料电池系统,包括换热系统和依次连接的DMFC电堆、微通道甲醇合成反应器、膜分离器、CO₂吸收塔、藻类光生物反应器和化学链燃烧系统,DMFC电堆的阳极尾气和冷却水分别与微通道甲醇合成反应器的进口连接,经微通道甲醇合成、膜分离、CO₂吸收、藻类固碳和化学链燃烧过程实现CO₂的多级资源化利用;换热系统将DMFC电堆的冷却水余热分别与微通道甲醇合成反应器、膜分离器、CO₂吸收塔和藻类光生物反应器连接,实现反应热、分离热、吸收热、培养热等热能的梯级利用。

[0010] 在上述具有尾气处理功能的甲醇燃料电池系统中,将DMFC阳极尾气引入微通道反应器,在Cu基催化剂作用下,与H₂发生CO₂加氢合成甲醇反应,实现CO₂的原位转化利用,采

用高选择性渗透膜分离合成气,使CO₂进一步富集,为下游资源化利用提供高纯CO₂原料,富CO₂气体进入填料塔吸收器,采用醇胺、氨等溶液吸收CO₂,再生后得到高纯CO₂,CO₂贫气进入藻类光生物反应器,经藻类光合固定转化为藻类生物质,实现CO₂的生物转化利用,藻类培养尾气进入化学链燃烧系统,以金属氧化物为载氧体,在燃烧/还原循环中实现CO₂的捕集与释放,所得高纯CO₂可用于封存或合成燃料,构建多级换热网络,将DMFC电堆废热梯级利用于CO₂资源化单元,实现系统热集成,为合成反应、催化剂再生、藻类培养等提供热量,集成分布式控制系统,对各单元参数实时监控优化,保障系统的稳定高效运行。

[0011] 作为本申请的进一步改进,DMFC电堆采用对称板式结构,包括阳极板、阴极板、质子交换膜、集流体和端板;阳极板和阴极板上分别设有引入反应物和排出产物的流道。

[0012] 作为本申请的再进一步改进,微通道甲醇合成反应器采用板式多层装配结构,由内置催化剂涂层的微通道反应板和进出口集流板通过密封垫片堆叠而成;催化剂涂层负载Cu基活性组分;微通道反应板上加工有尺寸在毫米至微米量级的矩形微通道;进出口集流板分别与DMFC阳极尾气出口和甲醇合成产物出口连接,并设置有加热装置,控制反应器在最佳温度下运行。

[0013] 作为本申请的更进一步改进,膜分离器采用中空纤维膜或管式膜等非对称结构的分离膜组件,CO₂优先渗透至膜的低压侧实现富集,渗透侧保持真空或低压状态;未渗透的组分在高压侧形成CO₂贫气体,排至下一级单元;膜分离器进料来自微通道甲醇合成反应器的产物气,出料分别送至CO₂吸收塔和藻类光生物反应器。

[0014] 作为本申请的又一种改进,CO₂吸收塔为填料塔结构,塔内填充高比表面积的规整填料和CO₂吸收剂,填料材质选用耐腐蚀、高强度的金属或陶瓷材料;CO₂吸收剂选用醇胺类、氨类或碱类溶液;CO₂吸收塔采用逆流操作,塔底入口连接膜分离器的CO₂富气,塔顶喷淋入口连接换热系统的热媒,吸收剂在填料表面与CO₂充分接触,实现CO₂的化学吸收;吸收产物经再生塔加热再生,实现吸收剂循环利用和CO₂的释放。

[0015] 作为本申请的又一种改进的补充,藻类光生物反应器采用管式或板式结构,由透明材料制成,藻种为生长速率快、CO₂利用率高的微藻品种;藻类光生物反应器配有补水和收集装置,藻类光生物反应器的进料为CO₂吸收塔排出的CO₂贫气和膜分离器渗透侧的CO₂贫气,经藻类光合固碳作用实现CO₂的生物转化。

[0016] 作为本申请的又一种改进的补充,化学链燃烧系统包括流化床燃烧反应器和还原反应器,并配有循环回路和气固分离装置;流化床燃烧反应器采用金属氧化物作为载氧体;载氧体在燃烧反应器中与来自藻类光生物反应器的CO₂贫气接触,生成碳酸盐;还原反应在还原反应器内进行,碳酸盐在还原剂如H₂气氛中被还原,生成CO₂气体和再生的载氧体;气固分离装置对燃烧和还原产物进行分离,实现CO₂的富集和载氧体的循环。

[0017] 作为本申请的再一种改进,换热系统采用多级换热网络,包括板式换热器、管壳式换热器;DMFC电堆的高温冷却水通过换热系统与微通道甲醇合成反应器、膜分离器、CO₂吸收塔分别进行热量交换;换热系统的低温冷却水与藻类光生物反应器进行热量交换,为藻类培养提供热量;换热系统还可回收化学链燃烧系统的高温烟气余热,还包括基于工业以太网的分布式控制系统,由现场总线、PLC、人机界面和上位机组成;对各单元的温度、压力、流量、液位、pH值、气体组成等参数进行实时采集和反馈控制。

[0018] 一种具有尾气处理功能的甲醇燃料电池系统的使用方法,包括以下步骤;

S1、DMFC电堆在阳极和阴极分别发生甲醇氧化和氧还原反应,产生CO₂、H₂和电能,并释放反应热,通过冷却水带出;

S2、DMFC阳极尾气和冷却水分别进入微通道甲醇合成反应器,在催化剂作用下,CO₂和H₂发生甲醇合成反应,冷却水放出热量维持反应器温度;

S3、甲醇合成产物气进入膜分离器,CO₂在压差作用下优先渗透,实现CO₂的富集和提纯,H₂则在高压侧排出;

S4、富CO₂气体进入CO₂吸收塔,与塔顶喷淋的吸收剂逆流接触,在填料表面发生化学吸收反应,CO₂被捕集;吸收热由冷却水提供;

S5、CO₂吸收塔顶部排出的CO₂贫气和膜分离器渗透侧的CO₂贫气一同进入藻类光生物反应器,在光照条件下,藻类通过光合作用将CO₂转化为有机物和O₂;藻类培养热由冷却水提供;

S6、藻类光合固碳后的CO₂贫气进入化学链燃烧系统,与流化床内的金属氧化物载氧体接触,发生燃烧反应,CO₂被捕集;还原反应将碳酸盐还原,释放CO₂;燃烧放出的热量可用于发电;

S7、换热系统在各资源化单元之间实现DMFC电堆冷却水热量的梯级利用;控制系统根据生产需求,调节各单元的运行参数,优化物料和能量的分配。

[0019] 综上所述,本申请具有以下有益效果:

1. 实现了DMFC电堆阳极尾气中CO₂的多级资源化利用;本发明将DMFC阳极尾气引入微通道甲醇合成反应器,在催化剂作用下与H₂发生合成反应,生成甲醇,实现CO₂的化学转化与资源再利用;未参与反应的CO₂经膜分离、化学吸收、藻类光合固定、化学链燃烧等后续过程进一步富集和转化,最终实现CO₂的近零排放,提升碳资源的利用效率。

[0020] 2. 实现了DMFC电堆余热的多级梯级利用;本发明设计的换热系统将DMFC电堆高温冷却水的余热分别引入微通道甲醇合成反应器、膜分离器、CO₂吸收塔,为合成、分离、吸收反应提供所需热量,实现反应热、分离热、吸收热的梯级利用;将低温冷却水引入藻类光生物反应器,为藻类培养提供热量,实现培养热的回收利用。此外,还可利用化学链燃烧系统产生的高温烟气余热发电。综合利用DMFC电堆的高品位和低品位余热,提高了能量利用效率。

[0021] 3. 构建了CO₂资源化利用的多技术耦合系统;本发明将DMFC技术与微通道合成、膜分离、化学吸收、藻类固碳、化学链燃烧等多种CO₂资源化技术耦合集成,形成了CO₂转化-分离-富集-固定-循环的全流程处理系统。各单元在CO₂转化与能量回收方面实现良性互补,既拓宽了CO₂减排途径,又提升了DMFC的能源转化效率。

[0022] 4. 实现了DMFC电堆与资源化单元的热量自供平衡;本发明将DMFC电堆余热精准匹配到各资源化单元的热量需求,通过高温热量驱动CO₂合成、分离、吸收,通过低温热量补充藻类培养,再将化学链燃烧放热回馈电堆,在系统内部实现热量自供平衡,降低了外部热源依赖,提高了系统的能量自立性和经济性。

[0023] 5. 建立了基于工业以太网的分布式控制系统;本发明针对DMFC电堆和多个资源化单元组成的复杂系统,设计了分层分布的控制系统架构,通过现场总线、PLC、人机界面和上位机的协同,实现了对各单元温度、压力、流量、液位、pH值、气体组成等关键参数的实时采集、反馈控制、联锁保护和优化调度,确保了系统的安全稳定运行和动态优化控制。

[0024] 6. 构筑了燃料电池与化学合成过程的能量梯级利用模式;本发明以DMFC电堆为能量中心,通过余热驱动微通道甲醇合成反应,将燃料电池发电与燃料合成过程能量耦合,在DMFC阳极尾气提供原料的同时,以DMFC电堆余热为动力,实现了燃料电池能量的梯级利用,拓展了燃料电池余热的高值化利用途径。

[0025] 7. 实现了电-热-燃料-化学品-生物质的多能互补与多元利用;本发明以DMFC电堆为电-热源,微通道合成反应器产出燃料甲醇,C02资源化单元产出化学品如C02吸收剂,藻类光生物反应器产出藻类生物质,多种能源形式在系统内部互补转化与循环利用,电、热、燃料、化学品、生物质多能流全面整合,发挥各自优势,实现能源的多元梯次利用,提高了能源综合利用效率。

[0026] 8. 本发明于DMFC电堆阳极尾气的C02减排与资源化利用,从源头、过程、末端多途径实现C02的循环利用,通过热量耦合实现系统内部资源自供平衡,最大限度地提高碳资源与能量利用效率。

附图说明

[0027] 图1为本申请的系统框架图;
图2为本申请的整体架构图;
图3为本申请的使用步骤图。

具体实施方式

[0028] 下面结合附图对本申请的三种实施方式作详细说明。

[0029] 第一种实施方式:

图1-图3示出,一种具有尾气处理功能的甲醇燃料电池系统,包括换热系统和依次连接的DMFC电堆、微通道甲醇合成反应器、膜分离器、C02吸收塔、藻类光生物反应器和化学链燃烧系统,DMFC电堆的阳极尾气和冷却水分别与微通道甲醇合成反应器的进口连接,经微通道甲醇合成、膜分离、C02吸收、藻类固碳和化学链燃烧过程实现C02的多级资源化利用;换热系统将DMFC电堆的冷却水余热分别与微通道甲醇合成反应器、膜分离器、C02吸收塔和藻类光生物反应器连接,实现反应热、分离热、吸收热、培养热等热能的梯级利用。

[0030] 首先,DMFC电堆在工作时,阳极产生C02和H2混合尾气,阴极产生H2O,同时电堆放出废热并通过冷却水带出。阳极尾气和冷却水分别进入微通道甲醇合成反应器。

[0031] 在微通道甲醇合成反应器中,C02和H2在催化剂作用下发生合成反应,生成甲醇。DMFC电堆的高温冷却水通过换热系统为合成反应提供热量,维持反应器在最佳温度下运行。合成后的气体进入膜分离器。

[0032] 膜分离器采用选择性渗透膜,优先分离出C02,使其在低压侧富集,同时H2在高压侧排出。换热系统利用DMFC冷却水余热为膜分离过程提供热量。富集的C02进入C02吸收塔。

[0033] C02吸收塔采用化学吸收剂如醇胺溶液,在填料表面与C02充分接触,发生化学吸收反应,捕集C02。吸收剂通过再生塔加热再生,释放出高纯C02,同时吸收剂循环使用。DMFC冷却水通过换热为吸收和再生过程提供热量。C02吸收塔顶排出C02贫气进入藻类光生物反应器。

[0034] 藻类光生物反应器利用藻类的光合作用,在C02贫气中固定C02,将其转化为藻类

生物质,同时释放O₂。换热系统中的低温冷却水为藻类培养提供热量,维持最佳生长温度。藻类固碳后的气体进入化学链燃烧系统。

[0035] 化学链燃烧系统采用金属氧化物如Fe₂O₃作为载氧体,在流化床燃烧反应器中与CO₂贫气接触,发生放热反应,生成碳酸盐。碳酸盐在还原反应器中被H₂还原,放出CO₂,并再生金属氧化物。如此循环实现CO₂的捕集与释放,同时燃烧放热可用于发电。

[0036] 整个系统在换热系统的热量匹配下,实现了CO₂转化、分离、富集、固定、循环利用的全流程,并通过DMFC冷却水余热的梯级利用,实现了系统热量自供平衡。

[0037] 多级CO₂资源化利用,系统通过微通道合成、膜分离、化学吸收、藻类固碳、化学链燃烧等多种手段,从源头到末端对CO₂进行全方位资源化利用,最大限度地提高碳资源利用效率,实现近零排放。

[0038] 废热多级梯级利用,系统将DMFC电堆的高温冷却水余热通过换热系统分别供给各CO₂资源化单元,提供合成、分离、吸收等反应热,并将低温冷却水用于藻类培养,实现热能的梯级匹配利用,提高能量利用效率。

[0039] 燃料电池与化学合成耦合,系统将DMFC发电过程与CO₂合成甲醇过程耦合,以DMFC阳极尾气为原料,DMFC余热为能量,实现燃料电池能量的梯级利用。

[0040] 系统内部热量自平衡,通过对DMFC电堆余热和化学链燃烧系统放热的精准匹配和梯级利用,实现了系统内部电-热-燃料-化学品-电的循环自供平衡,减少外部能源依赖。

[0041] 构建多能互补与协同网络,系统实现了DMFC发电、甲醇合成、CO₂化学吸收、藻类生物质能、化学链燃烧发电等多种能量形式的互补与协同,发挥各自优势,提高能源综合利用效率。

[0042] 模块化设计易于工程应用,系统采用模块化、一体化设计,各功能单元高度集成,运行灵活可控,便于放大应用与推广,可在分布式能源、移动电源等场景发挥碳减排与能量梯级利用的优势。

[0043] 进一步的,燃料电池电堆为直接液体燃料电池,包括但不限于DMFC、直接乙醇燃料电池、直接甲酸燃料电池等,微通道合成反应器中发生CO₂加氢合成甲醇、二甲醚等含氧燃料的反应,所用催化剂包括但不限于铜基、钨基、铈基等,光生物反应器中的光合微生物包括但不限于微藻、蓝细菌、光合细菌等,微生物通过固碳作用将CO₂转化为生物质、生物燃料等产物,化学链燃烧系统中的载氧体包括但不限于Fe₂O₃、NiO、CuO、Mn₂O₃等金属氧化物,载氧体通过燃烧-还原循环实现CO₂的捕集与释放,还包括固定化学链燃烧系统产生的CO₂的装置,如CO₂液化装置、CO₂管输装置、CO₂地质封存装置等,实现CO₂的长期固定与封存。

[0044] 第二种实施方式:

图1-图3示出,DMFC电堆采用对称板式结构,包括阳极板、阴极板、质子交换膜、集流体和端板;阳极板和阴极板上分别设有引入反应物和排出产物的流道。

[0045] DMFC电堆采用对称板式结构,主要由阳极板、阴极板、质子交换膜、集流体和端板组成。其中,阳极板和阴极板分别设有引入反应物(甲醇溶液和空气)和排出产物(CO₂和未反应燃料、水)的流道。工作时,甲醇溶液通过阳极流道向阳极催化剂层输送,在阳极催化剂作用下,甲醇发生电催化氧化,生成CO₂、质子和电子。质子通过质子交换膜向阴极迁移,电子通过外电路向阴极转移。阴极通过流道引入空气,在阴极催化剂作用下,氧气与质子和电子反应生成水。整个过程伴随电能的释放,同时产生CO₂/H₂混合尾气和反应热。集流体起到

收集电流和均布反应物的作用,端板将电池组件紧密压合,形成电堆。

[0046] 对称板式结构紧凑,体积和重量小,有利于提高电堆的比功率和能量密度,阳极和阴极分别设置流道,优化了反应物的传质分布,提高了反应的均匀性和转化率,质子交换膜的质子导电性能好,可有效隔绝燃料和氧化剂,防止反应物的直接混合,提高电池效率,集流体降低了电子传输阻力,端板保证了电池组件的紧密接触和密封性能,提高了电堆的机械强度和稳定性。

[0047] 进一步的,阳极板和阴极板采用石墨、不锈钢、钛或导电高分子等材料制成,兼具导电性和耐腐蚀性,阳极和阴极催化剂层采用贵金属如Pt、Pt-Ru合金或非贵金属如Fe-N-C等,利用喷涂、丝网印刷等方法制备,催化剂用量可控制在0.5-4 mg/cm²,质子交换膜采用全氟磺酸类聚合物如Nafion系列,或脂类、杂多酸掺杂改性的复合膜,兼顾质子导电性和机械强度,电堆采用大面积薄型MEA设计,电极面积在25-500 cm²,厚度控制在1 mm以内,有利于降低欧姆损失和传质极化,电堆可采用空气冷却、液冷却或相变冷却等方式,控制运行温度在60-90℃,高温有利于提高反应动力学和传质性能,电堆可采用双极板内置流道、端板内置流道、阴阳极分立流道等多种流场设计,优化流道截面、走向、长度等参数,降低压降和液滴堵塞。

[0048] 微通道甲醇合成反应器采用板式多层装配结构,主要由内置催化剂涂层的微通道反应板和进出口集流板通过密封垫片堆叠而成。其中,微通道反应板采用金属材料加工制成,表面加工有尺寸在毫米至微米量级的矩形微通道,内壁涂覆负载Cu基活性组分的催化剂涂层。进出口集流板分别与DMFC阳极尾气出口和甲醇合成产物出口连接,并内置加热装置,控制反应器在最佳温度下运行。工作时,DMFC阳极尾气(CO₂/H₂)通过进口集流板引入,在微通道内与催化剂充分接触,发生CO₂加氢合成甲醇的反应(CO₂+3H₂→CH₃OH+H₂O)。合成的甲醇和未反应气体通过出口集流板排出。整个过程在200-300℃和2-5 MPa条件下进行,换热系统利用DMFC冷却水热量维持反应器恒温。

[0049] 微通道结构的比表面积大,传热传质性能好,强化了CO₂和H₂与催化剂的接触,提高了反应转化率和甲醇时空产率,板式多层装配使反应器结构模块化、紧凑化,体积小,便于放大,且配置灵活,可方便地增减反应通道层数以适应不同规模,金属微通道具有优异的导热性和机械强度,可承受高温高压反应条件,且有良好的成型加工性和密封性,Cu基催化剂CO₂加氢性能好,选择性高,在微通道反应器中分散性好,与反应物接触充分,提高了催化效率和稳定性,进出口集流板与DMFC系统直接对接,利用其阳极尾气为原料,简化了物料输送,降低了能耗;加热装置利用DMFC冷却水余热,实现热量梯级利用,提高了能效。

[0050] 进一步的,微通道截面形状还可采用半圆形、梯形、三角形等,截面尺寸可优化在0.1-1 mm量级,通道长度可优化在50-500 mm,微通道加工方法还可采用激光、3D打印等,材料还可选择陶瓷、塑料等,催化剂涂层制备方法还可采用电沉积、浸渍、溅射等,负载的活性组分还可含Zn、Zr、Ga、Pd等助剂,反应温度可在200-400℃范围优化,压力可在1-10 MPa范围优化,温度越高,平衡转化率越高,压力越高,反应速率越快,换热系统还可利用发热反应(如甲醇重整)、电加热、电磁感应等方式辅助加热,多种热源匹配,减少热损失,在反应器出口可设置冷凝分离装置,实现甲醇产物与未反应气体的快速分离,提高甲醇产品纯度。还可集成膜反应器,实现反应-分离耦合强化。

[0051] 膜分离器进料来自微通道甲醇合成反应器的产物气,出料分别送至CO₂吸收塔和

藻类光生物反应器。

[0052] 膜分离器采用中空纤维膜或管式膜等非对称结构的分离膜组件,以高透CO₂选择性聚合物材料制成。工作时,来自微通道甲醇合成反应器的含CO₂产物气体通入膜分离器,在压差驱动下,CO₂优先渗透至膜的低压侧并富集,渗透侧保持真空或负压状态以提供足够的驱动力。未渗透的H₂、N₂等组分则滞留在膜的高压侧,形成CO₂贫气体,排至下游。膜分离单元通常由多根平行的中空纤维膜或管式膜串并联组装在壳体中,高压原料气从壳程进入,渗透气从管程出口排出。分离过程在50-150℃下进行,换热系统利用DMFC冷却水热量维持膜组件恒温并提高渗透通量。

[0053] 非对称分离膜具有CO₂/H₂高选择性,能有效分离CO₂,使其得到富集,为下游吸收提供高纯CO₂原料,减小设备尺寸,膜法分离过程耗能低,无相变,设备简单紧凑,操作灵活,易于放大与集成,可显著降低CO₂分离成本,中空纤维膜和管式膜具有高密度、大比表面积特点,传质速率快,渗透通量高,且制备工艺相对成熟,分离过程温和,压差驱动,无化学反应,膜材料在分离过程中保持稳定,使用寿命长,膜分离与DMFC发电、CO₂吸收、甲醇合成反应耦合,可简化CO₂资源化利用流程,提高能效。

[0054] 进一步的,分离膜材料还可采用掺杂改性聚合物,或无机陶瓷、分子筛、金属有机框架等,膜组件结构还可采用平板式、卷式等,多级分离可进一步提高CO₂纯度和回收率,渗透侧真空度越高,或采用惰性气体吹扫,CO₂渗透分离推动力越大,通量越高,在膜组件进口可设置预处理装置,如除尘、脱水、净化等,减少杂质对膜性能的影响,膜法分离可与变压吸附(PSA)、低温蒸馏等方法联用,实现CO₂的提纯与液化,通过优化膜组件设计和操作参数,可在满足CO₂渗透通量的同时,最大限度地减小H₂渗透损失,提高H₂的利用率。

[0055] CO₂吸收塔为填料塔结构,塔内填充高比表面积的规整填料和CO₂吸收剂,填料材质选用耐腐蚀、高强度的金属或陶瓷材料;CO₂吸收剂选用醇胺类、氨类或碱类溶液;CO₂吸收塔采用逆流操作,塔底入口连接膜分离器的CO₂富气,塔顶喷淋入口连接换热系统的热媒,吸收剂在填料表面与CO₂充分接触,实现CO₂的化学吸收;吸收产物经再生塔加热再生,实现吸收剂循环利用和CO₂的释放。

[0056] CO₂吸收塔,塔底设有气体分布器,将来自膜分离器的CO₂富气体均匀布气后自下而上通过填料层。同时,塔顶设有液体分布器,将CO₂吸收剂如醇胺类(MEA、DEA等)、氨类或碱类(氢氧化钠、碳酸钾等)溶液均匀喷淋,自上而下通过填料层,实现气液逆流接触。CO₂与下降的吸收剂在填料表面充分接触反应,生成碳酸盐或氨基甲酸盐,从而被吸收剂捕集。未吸收的尾气则从塔顶排出。富CO₂吸收剂从塔底抽出,送入再生塔加热,在100-150℃下解吸再生,释放出高纯CO₂,同时再生后的吸收剂冷却后回到吸收塔顶继续使用。整个过程中,换热系统利用DMFC冷却水热量为吸收和再生塔提供热量。

[0057] 填料塔填料比表面积大,强化了CO₂与吸收剂的接触与传质,保证了较高的CO₂去除率,逆流操作使CO₂分压和吸收剂浓度呈逆向梯度分布,推动力恒定,传质效率高,减小了塔高,高CO₂分压和低温有利于吸收,塔压一般控制在0.1-0.5 MPa,温度控制在40-80℃,吸收效率高,醇胺、氨、碱类吸收剂CO₂吸收容量大,选择性好,成本低,对设备腐蚀性小,应用广泛,吸收剂可循环使用,再生条件温和,加热再生塔耦合DMFC冷却水余热利用,可降低能耗,与微通道反应器、膜分离器串联,CO₂逐级富集,可获得高纯CO₂,为下游利用创造条件。

[0058] 进一步的,塔设计可采用填料塔、鼓泡塔、喷淋塔、旋流塔等多种形式,如采用鼓泡

塔可强化气液传质,填料材质和尺寸可优化,如采用高堆填密度、高空隙率的新型填料,强化CO₂吸收传质,减小液阻,塔内可加装除沫器和再分布器,减少液滴夹带,强化气液分布,提高塔效,吸收剂配方可优化,如醇胺与催化剂复配,促进CO₂吸收动力学;碱液添加络合促进剂,抑制设备腐蚀,在再生塔前可增设闪蒸罐,通过减压闪蒸预脱除CO₂,降低再生能耗。也可采用多级闪蒸,提高能效,吸收过程与膜分离可集成,通过循环液膜吸收CO₂,简化流程;与电解可集成,原位电解再生吸收剂。

[0059] 藻类光生物反应器配有补水和收集装置,藻类光生物反应器的进料为CO₂吸收塔排出的CO₂贫气和膜分离器渗透侧的CO₂贫气,经藻类光合固碳作用实现CO₂的生物转化。

[0060] 藻类光生物反应器采用透明的管式或板式结构,尺寸一般为长1-3 m,直径5-30 cm(管式)或厚2-10 cm(板式),材质选用玻璃、亚克力等透明材料。反应器内接种生长速率快、CO₂利用率高的微藻品种,如小球藻、螺旋藻等。藻种在含CO₂培养基中生长,通过光合作用固定CO₂。反应器配备补水装置,定期补充因蒸发损耗的水分;还配备收集装置,定期收获生长成熟的藻体。工作时,来自CO₂吸收塔排出的CO₂贫气和膜分离器渗透侧的CO₂贫气通入反应器底部,在藻液中曝气,使CO₂充分溶解;溶解的CO₂在藻类细胞的羧化酶催化下转化为有机物,形成藻体;同时释放O₂,由顶部排出。反应器内设有搅拌装置,使藻液均匀曝光,还可通过外循环泵实现藻液在多个反应器间的循环。整个过程在常压、20-30°C、弱碱性pH下进行,光照强度保持在50-200 μmol/(m²·s)。换热系统利用DMFC低温冷却水为藻类培养提供热量,维持最佳温度。

[0061] 藻类光合固碳效率高,CO₂利用率可达10-50%,高于高等植物,可有效去除CO₂,藻类生物质产量高,是极具潜力的CO₂捕集途径,同时将CO₂转化为可再生能源或高值化学品,反应器结构简单,透光性好,有利于光能利用;管式/板式设计放大系数大,便于扩容,补水和收集装置可实现水分回收和藻体收集,提高水资源和生物质产品的利用效率,常温常压操作,能耗低;弱碱性pH环境抑制污染,适合藻类生长;DMFC冷却水直接利用,可减少加热能耗,多级串联,CO₂贫气逐级利用,提高总CO₂去除率;分布式布置,可就近利用DMFC尾气,减少输送成本。

[0062] 进一步的,所用藻种可根据CO₂浓度、温度等条件筛选,如高CO₂适应性藻种,低温藻种,抗污染藻种等,反应器可采用浸没式、卧式、立式等多种形式,如生物膜反应器,强化气液传质,藻类固定化生长,减少能耗,光照可采用太阳光、人工光源组合,优化光谱和强度;也可采用光纤导光、光扩散器均匀布光,藻液可添加碳酸氢盐等无机碳源作为CO₂载体,促进CO₂吸收;也可掺混废水,利用其中N、P营养盐,藻体可提取生物柴油、饲料蛋白、色素虾青素等产品,实现CO₂固定与资源化耦合,系统可集成藻类收集、浓缩、干燥、提取等后处理单元,实现藻类生物质的全过程制备。

[0063] 化学链燃烧系统包括流化床燃烧反应器和还原反应器,并配有循环回路和气固分离装置;流化床燃烧反应器采用金属氧化物(如Fe₂O₃、CuO等)作为载氧体;载氧体在燃烧反应器中与来自藻类光生物反应器的CO₂贫气接触,生成碳酸盐;还原反应在还原反应器内进行,碳酸盐在还原剂如H₂气氛中被还原,生成CO₂气体和再生的载氧体;气固分离装置对燃烧和还原产物进行分离,实现CO₂的富集和载氧体的循环。

[0064] 在系统启动时,载氧体颗粒在反应器内形成流态化。工作时,藻类光生物反应器排出的CO₂贫气通入反应器底部,使载氧体流化,并在800-1000°C下发生放热反应: $MxOy +$

$\text{CO}_2 \rightarrow \text{M}_x\text{O}_y-1 + \text{CO}_2$,生成碳酸盐;反应放出的热量可通过管壁面传热面用于发电。载氧体碳酸盐 M_xO_y-1 经旋风分离器、高温过滤器分离后,进入还原反应器,在 $500-800^\circ\text{C}$ H_2 气氛中被还原,释放出 CO_2 ,载氧体再生: $\text{M}_x\text{O}_y-1 + \text{H}_2 \rightarrow \text{M}_x\text{O}_y + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 。还原后的载氧体经冷却后回到燃烧反应器,实现循环利用。还原产生的 CO_2 经气固分离装置提纯后,可实现封存或进一步利用。整个循环过程即为燃烧/还原的化学链过程,载氧体起到传递氧的作用。

[0065] 燃烧反应放热,可实现 CO_2 零排放的同时,将部分化学能转化为热能用于发电,载氧体可多次循环使用,减少固体废弃物排放,系统耗材成本低,载氧体与 CO_2 直接接触反应,无需分离空气制取纯氧,系统运行成本低,燃烧温度 $800-1000^\circ\text{C}$,反应热力学有利,燃烧彻底, CO_2 捕集效率高,采用流态化床反应器,气固传质效率高,反应速率快,设备强度小,运行稳定,燃烧还原分别在两个反应器中进行,使还原气氛中不掺杂 N_2 , CO_2 易于捕集。

[0066] 进一步的,所用载氧体可采用复合金属氧化物,提高反应活性和抗烧结性,如改性铁铝尖晶石等,还原剂可采用煤气、天然气等含碳燃料,并掺混 H_2 ,实现部分自供热;也可采用生物质热解气、焦炉气等,循环回路可采用提升管、L 阀等气力输送设备或机械输送设备,实现载氧体在反应器间的气力或重力循环,气固分离可采用旋风分离、高温陶瓷过滤、高温电除尘等多级集成,提高烟气除尘效率,燃烧反应器出口烟气显热可通过余热锅炉回收,与DMFC 冷却水换热发电,进一步提高能量利用效率,可在系统中掺烧生物质等含碳可再生燃料,实现负碳排放;也可掺烧垃圾焚烧尾气,协同处置。

[0067] 换热系统采用多级换热网络,包括板式换热器、管壳式换热器;DMFC电堆的高温冷却水通过换热系统与微通道甲醇合成反应器、膜分离器、 CO_2 吸收塔分别进行热量交换;换热系统的低温冷却水与藻类光生物反应器进行热量交换,为藻类培养提供热量;换热系统还可回收化学链燃烧系统的高温烟气余热。

[0068] 换热系统采用多级换热网络,由板式换热器、管壳式换热器等高效紧凑型换热器组成,分别与DMFC电堆和各 CO_2 资源化单元连接,实现冷热流体的逆流多级换热。其中,DMFC电堆产生的高温(如 $70-90^\circ\text{C}$)冷却水,先通过板式换热器与微通道甲醇合成反应器内的反应物进行换热,为合成反应提供热量;然后与膜分离器进行换热,维持膜材料在适宜温度;再与 CO_2 吸收塔底部气体换热,维持塔底温度,减少水蒸气凝结。高温冷却水经三级串联换热后温度降至 $40-60^\circ\text{C}$,成为低温冷却水,进入管壳式换热器与藻类光生物反应器内的藻液换热,控制藻类培养在最佳温度范围。低温冷却水还可收集化学链燃烧系统排出的高温(如 $300-500^\circ\text{C}$)烟气余热,通过余热锅炉、管壳式换热器将其梯级回收利用,最后冷却水温度降至常温后排放或循环使用。

[0069] 实现DMFC电堆冷却水余热的全梯次、多级回收利用,提高能源利用效率,分别为 CO_2 资源化单元提供不同品位的热量,实现热量的定制化匹配供给,采用板式和管壳式换热器,传热系数高,结构紧凑,设备投资省,占地少,冷却水直接作为换热介质,减少中间传热环节,降低传热损失和运行成本,多级串联布置,实现逆流换热,温差利用充分,避免掺混和热量降级利用,收集高温烟气余热,减少废热排放,一方面为DMFC预热冷却水,一方面可发电。

[0070] 进一步的,高温冷却水与甲醇合成反应器的换热温度可为 $180-280^\circ\text{C}$,与 CO_2 吸收塔换热温度可为 $60-100^\circ\text{C}$,板式换热器内可填充高导热填料如金属网、金属泡沫等,强化传

热,减小设备尺寸;管壳式换热器管程可采用翅片管、螺旋管等强化传热管,在各换热器进出口可设置旁路阀、混水阀,通过分流、混流方式灵活调节冷热流体的温度和流量,适应工况波动,在换热网络系统中可集成吸收式制冷机、吸收式热泵等,利用DMFC中温冷却水余热制取冷(热)量,提高品位,高温烟气余热回收可采用烟气-水换热、烟气-导热油-水的两级换热、烟气-空气-水的两级换热等方式,匹配烟气温度变化,在换热器之间可设置蓄热水箱,利用水的大比热容量特性,削峰填谷,协调冷热负荷波动。

[0071] 还包括基于工业以太网的分布式控制系统,由现场总线、PLC、人机界面和上位机组成;对各单元的温度、压力、流量、液位、pH值、气体组成等参数进行实时采集和反馈控制。

[0072] 其中,现场总线连接各CO₂资源化单元的温度、压力、流量、液位、pH值、气体组成等传感器和仪表,以及阀门、泵、搅拌器等现场执行机构,实现生产过程数据的采集和下发控制指令。PLC控制器接收现场总线采集的过程参数,按照预设的控制逻辑和算法进行PID调节、顺控、联锁等控制运算,并将控制指令通过总线下发给执行机构。人机界面实现过程参数、设备状态、报警信息等的可视化,并提供操作员手动干预、参数设定、曲线趋势显示等功能。上位机负责生产调度优化、设备管理、能耗统计、产品质量分析等,并与ERP、MES等上层管理信息系统交互。在系统运行时,各资源化单元将温度、压力、流量、液位、pH值、气体组成等参数实时上传给PLC,PLC按照人机界面或上位机设定的目标值和控制策略,对设备进行反馈控制,协调各单元的物料平衡和能量平衡,保证生产稳定运行。同时针对设备故障、参数越限等异常工况,报警提示或自动切换备用系统。

[0073] 基于工业以太网的通信架构,控制系统开放性好,组网灵活,扩展方便,易于集成,分布式控制,现场智能化,就近控制,响应及时,可靠性高,控制精度高,有利于大规模系统的稳定控制,冗余配置,容错能力强,关键部件如PLC、电源、通信等模块化热插拔,易于维护和升级改造,友好的人机界面,直观显示过程状态,便于操作员监控和操作;灵活的组态软件,易于控制策略的调整,实时和历史数据管理,为生产优化、工艺诊断、设备预测性维护等提供数据支撑,先进控制算法如模糊控制、神经网络、多变量解耦等在上位机或PLC中实现,多目标优化控制系统能效。

[0074] 进一步的,现场总线可采用现场总线、基础现场总线、设备网的通信协议;PLC可选用冗余CPU架构,支持IEC 61131-3标准编程语言,人机界面可采用触摸屏、大屏幕拼接墙等,实现集中控制和现场操作的有机结合;也可采用移动终端如平板电脑实现移动巡检,上位机可采用工业服务器,配置数据采集与监视控制(SCADA)、制造执行系统(MES)等软件平台。

[0075] 第三种实施方式:

图1-图3示出,一种具有尾气处理功能的甲醇燃料电池系统的使用方法,包括以下步骤;

S1、DMFC电堆在阳极和阴极分别发生甲醇氧化和氧还原反应,产生CO₂、H₂和电能,并释放反应热,通过冷却水带出;

S2、DMFC阳极尾气和冷却水分别进入微通道甲醇合成反应器,在催化剂作用下,CO₂和H₂发生甲醇合成反应,冷却水放出热量维持反应器温度;

S3、甲醇合成产物气进入膜分离器,CO₂在压差作用下优先渗透,实现CO₂的富集和提纯,H₂则在高压侧排出;

S4、富CO₂气体进入CO₂吸收塔,与塔顶喷淋的吸收剂逆流接触,在填料表面发生化学吸收反应,CO₂被捕集;吸收热由冷却水提供;

S5、CO₂吸收塔顶部排出的CO₂贫气和膜分离器渗透侧的CO₂贫气一同进入藻类光生物反应器,在光照条件下,藻类通过光合作用将CO₂转化为有机物和O₂;藻类培养热由冷却水提供;

S6、藻类光合固碳后的CO₂贫气进入化学链燃烧系统,与流化床内的金属氧化物载氧体接触,发生燃烧反应,CO₂被捕集;还原反应将碳酸盐还原,释放CO₂;燃烧放出的热量可用于发电;

S7、换热系统在各资源化单元之间实现DMFC电堆冷却水热量的梯级利用;控制系统根据生产需求,调节各单元的运行参数,优化物料和能量的分配。

[0076] 该方法利用DMFC电堆尾气处理系统,通过七个步骤实现CO₂的多级资源化利用和DMFC冷却水余热的梯级利用。首先,DMFC电堆在发电的同时,阳极和阴极分别发生甲醇氧化和氧还原反应,产生CO₂/H₂混合尾气和电能,并释放反应热(S1)。然后,CO₂/H₂尾气和DMFC冷却水分别进入微通道甲醇合成反应器,在Cu基催化剂作用下,发生CO₂加氢合成甲醇的反应,DMFC冷却水则为反应提供热量,维持反应温度(S2)。合成产物气体进入膜分离器,利用压差作为驱动力,使CO₂优先渗透富集,而H₂则滞留在高压侧得到提纯(S3)。富集的CO₂进入CO₂吸收塔,与塔顶喷淋而下的吸收剂(如醇胺溶液)逆流接触,在填料表面发生化学吸收反应而被捕集,DMFC冷却水为吸收提供热量(S4)。CO₂吸收后排出的贫气与膜分离器的CO₂贫气一起进入藻类光生物反应器,在藻类的光合作用下,CO₂被转化为藻类生物质和O₂,DMFC冷却水为藻类培养提供热量(S5)。藻类固定CO₂后排出的贫气进入化学链燃烧系统,在流化床反应器中与金属氧化物载氧体接触,发生放热燃烧反应生成碳酸盐,再在还原反应器中被还原放出CO₂,实现CO₂的捕集与再释放,并将燃烧热用于发电(S6)。整个过程中,换热系统在各CO₂资源化单元之间实现DMFC冷却水热量的梯级匹配利用,同时控制系统根据生产需求实时调节各单元的工况,优化物料和能量的分配(S7)。

[0077] 多途径协同转化利用CO₂,该方法采用甲醇合成、吸收捕集、藻类固碳、化学链燃烧等多种CO₂资源化技术,从源头、过程和末端对DMFC尾气中的CO₂进行全方位转化利用,最大化CO₂资源化效率。

[0078] 源头减排与过程增效并重,在CO₂源头,通过CO₂加氢合成甲醇实现CO₂的化学还原利用;在CO₂捕集过程,通过膜分离、化学吸收、藻类固碳、化学链燃烧技术,实现CO₂的阶段富集、连续净化与循环利用。

[0079] 余热多级利用,实现能量梯级匹配:利用换热系统将DMFC冷却水余热按品位分配至CO₂资源化单元,为合成、吸收、藻类培养等提供热量,实现热能的梯级匹配利用,构建热量自供平衡。

[0080] 可再生燃料多效转化,通过CO₂加氢合成可再生甲醇燃料,通过藻类固碳制备生物燃料,并将化学链燃烧热用于发电,实现 DMFC发电-燃料合成-固碳制备燃料-燃烧发电多效转化过程耦合。

[0081] 模块化设计,灵活可控,该方法基于DMFC电堆模块,集成CO₂资源化功能模块,运行灵活可控;各模块可根据需求灵活增删组合,实现废气处理能力与DMFC电堆的匹配。

[0082] 流程集成,布置紧凑,气态CO₂逐级富集转化,各单元串联,传质顺畅,系统集成度

高;与DMFC电堆并联,布置紧凑,占地小,易于就地部署。

[0083] 进一步的,步骤S2中,C02加氢合成甲醇的反应可在200-400°C、1-10 MPa、氢碳比为3:1至10:1的条件下进行,GHSV为1000-10000 h⁻¹,还可引入超临界C02相提高传质,步骤S3中,膜分离器的操作压力可为1-5 MPa,控制C02渗透侧真空度在1-10 kPa,C02/H2选择性可达10-100,C02渗透通量可达0.1-1 mol/(m²·s),步骤S4中,C02吸收塔的操作压力可为0.1-0.5 MPa,温度为40-80°C,可采用多级串联提高总去除率,步骤S5中,藻类光生物反应器的藻种可选用小球藻、螺旋藻、衣藻等,光照强度为50-500 μE/(m²·s),温度为20-35°C,步骤S6中,化学链燃烧系统的燃烧温度可为800-1200°C,还原温度为500-900°C,在步骤S4和S6之间,可引入湿法/干法C02矿化步骤,将C02转化为无机碳酸盐固定,实现C02的永久封存,各C02资源化单元可根据DMFC尾气的C02浓度、流量等,灵活调整各单元的物料配比和运行时序,实现系统动态优化控制,可集成在线检测仪表和智能控制算法,根据DMFC电堆的工况波动,实时调控尾气处理单元的运行参数,实现系统的协同稳定运行。

[0084] 结合当前实际需求,本申请采用的上述实施方式,保护范围并不局限于此,在本领域技术人员所具备的知识范围内,不脱离本申请构思作出的各种变化,仍落在本发明的保护范围。

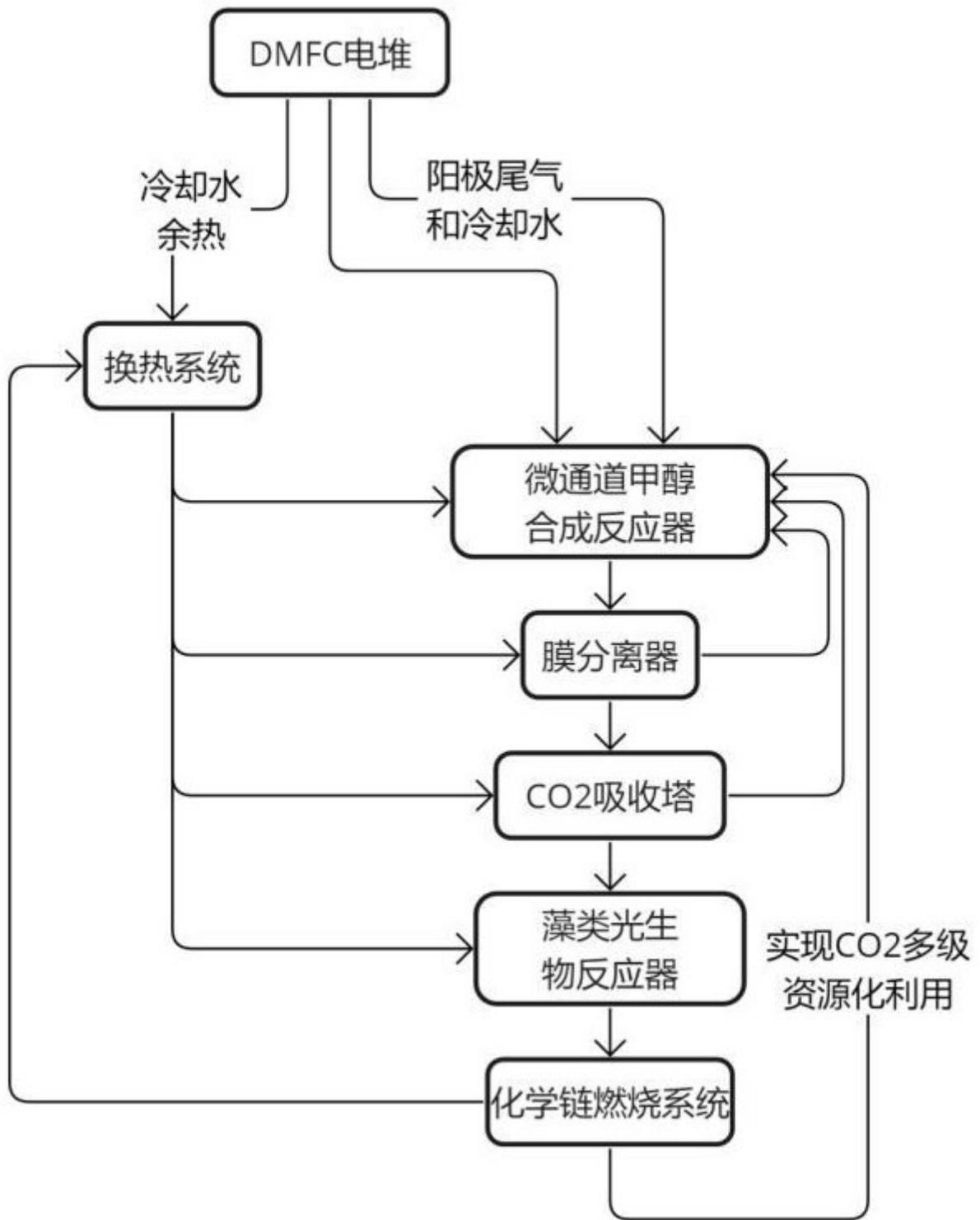


图 1

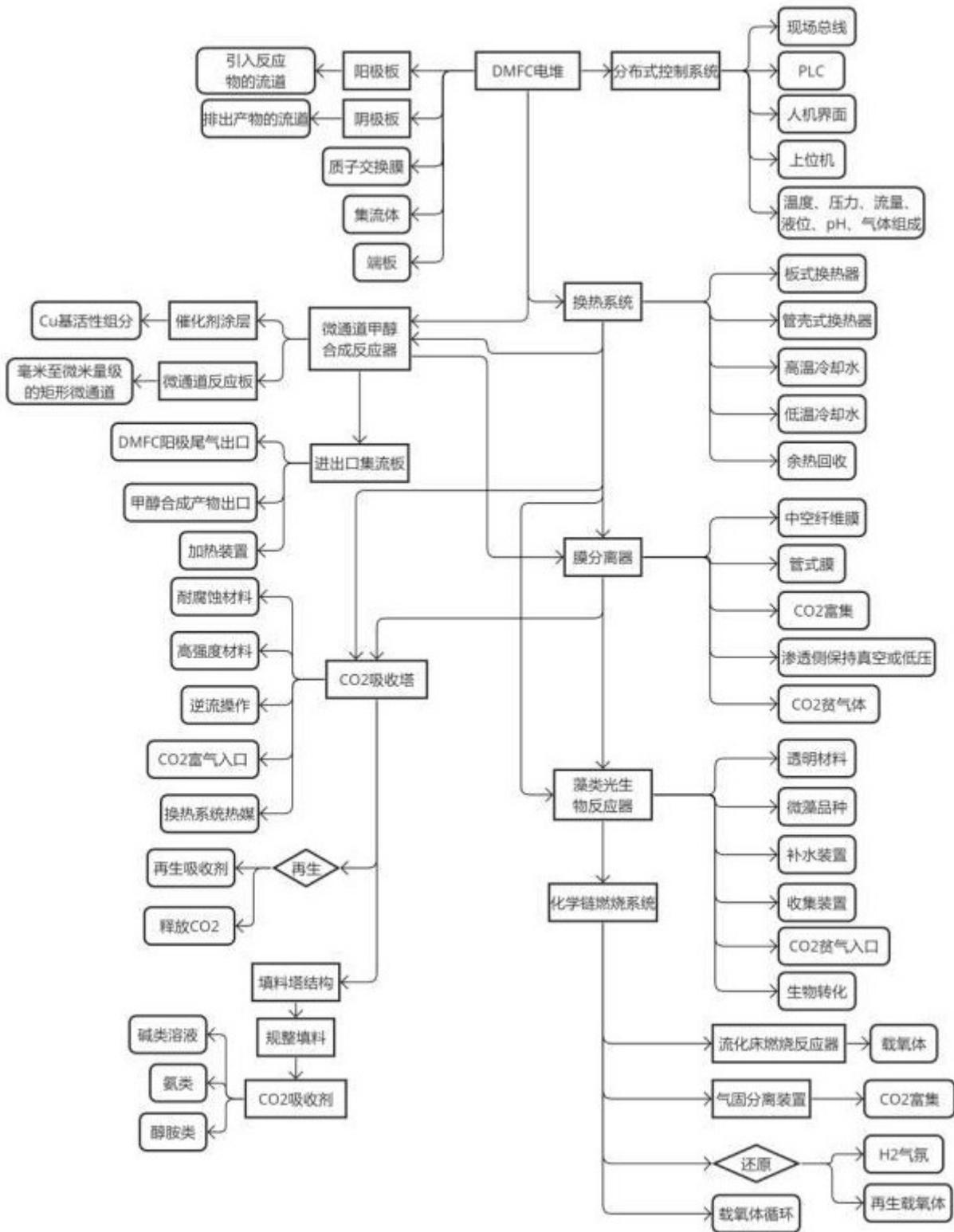


图 2

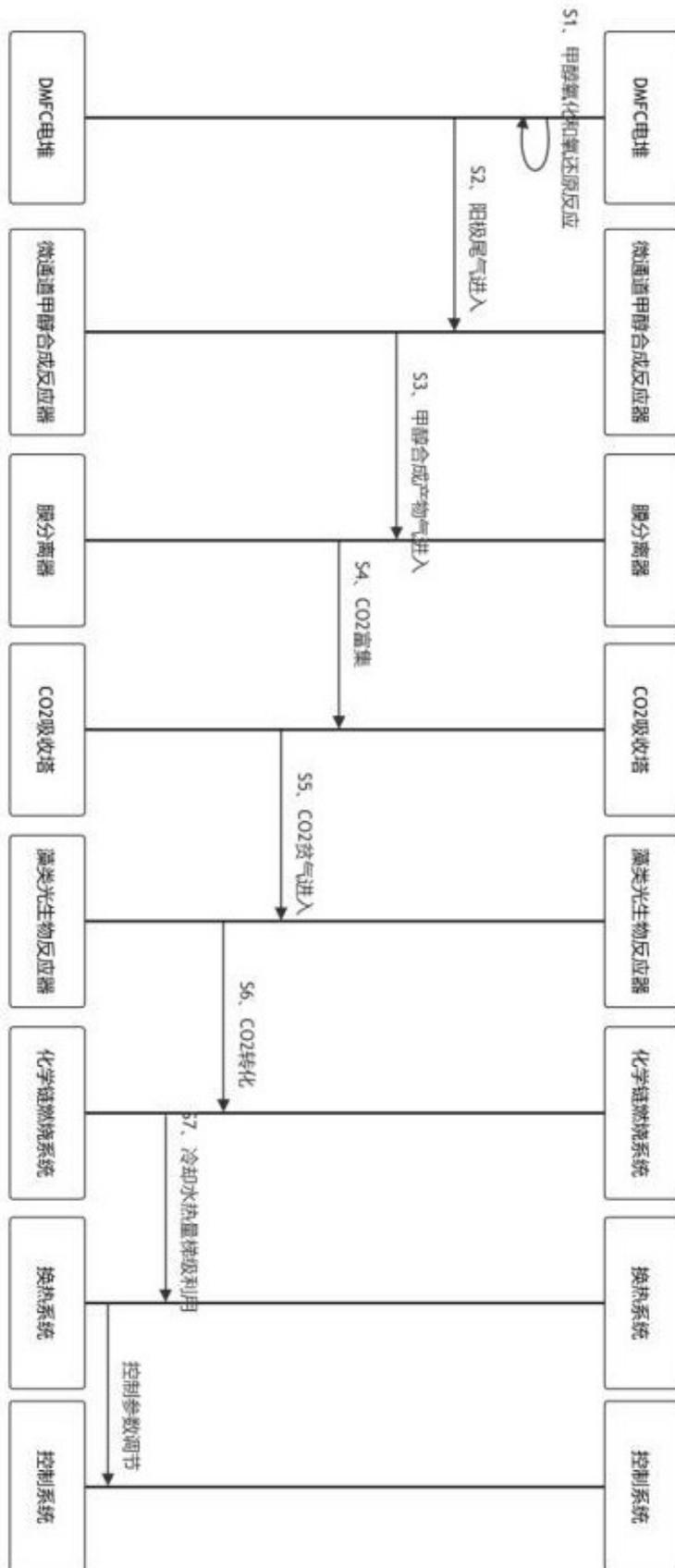


图 3