



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105654997 B

(45)授权公告日 2017.07.25

(21)申请号 201610028767.4

审查员 卑晓峰

(22)申请日 2016.01.15

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 105654997 A

(43)申请公布日 2016.06.08

(73)专利权人 中国科学技术大学

地址 230026 安徽省合肥市包河区金寨路  
96号

(72)发明人 龚正 宋云涛

(74)专利代理机构 北京科迪生专利代理有限公司 11251

代理人 成金玉 孟娟

(51)Int.Cl.

G21F 9/02(2006.01)

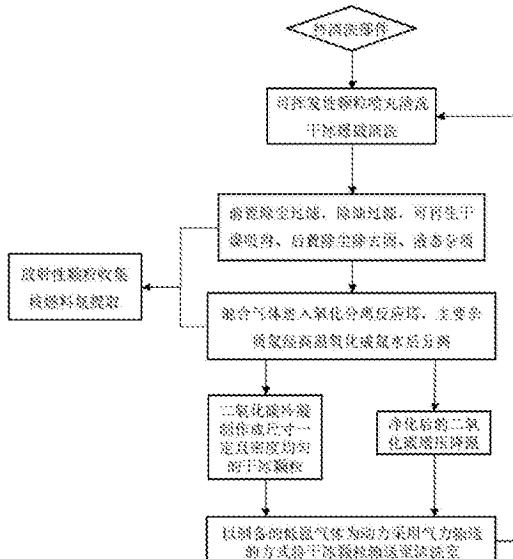
权利要求书3页 说明书8页 附图2页

(54)发明名称

一种聚变堆热室清洗废气氧化分离净化再生利用方法及装置

(57)摘要

本发明涉及一种聚变堆热室内清洗废气氧化分离净化再生利用方法及装置,包括清洗去污、固态、液态杂质过滤净化、气态放射性杂质氧化分离净化、低温动力气体制备、可挥发性颗粒再生、可挥发性颗粒远距离气力输送工艺6个工艺流程,利用原有清洗废气,实现放射性颗粒和残留放射性气体与清洗介质的分类收集和分离;解决了热室内放射性废物最少化的难题。保障清洗废气不作为放射性流出物污染环境的同时,还能够有效收集放射性颗粒和气态核燃料,并且使得原用清洗介质回收循环使用,在此基础之上使得二氧化碳干冰爆破清洗方案,能够成为热室内清洗污染放射性表面的首选方案,并且本工艺方案回路结构简单,容易实现,适合远程遥控操作的热室环境中。



1. 一种聚变堆热室清洗废气氧化分离再生利用方法,其特征在于实现步骤如下:

(1) 清洗去污工艺:将可挥发性清洗介质干冰颗粒在助推气体高压二氧化碳的推送下,喷射在待清洗表面,在碰撞待清洗表面的同时可挥发性颗粒破碎气化,撞击和挥发气化时产生的压力将清洗表面黏连附着的污染物与清洗表面分离,在密闭的清洗室内形成具有一定压力的载带着放射性颗粒的混合气体,可挥发性颗粒不断升华,使得清洗室内压力升高,之后以气流为依托,载带从污染表面清洗分离下的放射性颗粒离开清洗室,进入固态、液态杂质过滤净化工艺流程;

(2) 固态、液态杂质过滤净化工艺:对载带着放射性颗粒的混合气体首先进行前置除尘过滤,除去废气中的固体放射性颗粒的同时,集中收集防止其扩散,完成前置除尘过滤;再进行除油过滤处理,除去废气中夹杂的油脂类物质,之后进入微热再生气体干燥器除去混合气中的氚水蒸气,完成除水过滤,最后再经过后置除尘过滤二次过滤固态杂质;上述工艺完成后,混合气体完成了固态、液态杂质的分离,剩下的混合气体中主要含有作为助推气体和清洗介质升华后的二氧化碳气体和需要除去的放射性核燃料氚以及微量的无害冷却剂氦和其他无害微量杂质;

(3) 气态放射性杂质氧化分离净化工艺:对经过步骤(2)的前置除尘、除油、除水和后置除尘四重过滤后的混合气体中的放射性核燃料氚送入氧化分离反应塔,与位于塔盘中的固体氧化剂填料进行250-500℃的高温反应,高温反应后主要的杂质气体氢的同位素氚被氧化成水,在氧化分离反应塔底部遇冷凝结成水蒸气后集聚在塔底,收集进入废液储罐集中存放待后处理,塔盘底部设有成分在线检测装置,不合格气体经反流回路返回反应塔顶部重新处理,合格成品气在出反应塔后再进行干燥,除尽氚水,得到洁净干燥的二氧化碳气体,之后进入储罐自然冷却备用;

(4) 低温动力气体制备工艺:由步骤(3)分离净化后洁净干燥的二氧化碳经过增压形成高压气体,通过管路输送至高压储罐,冷却降温后转化为-20℃—50℃低温动力气体,在需要使用时作为气力输送和清洗去污工艺中的动力源推送清洗介质可挥发性干冰颗粒,吹扫清洗室使用;

(5) 可挥发性颗粒再生工艺:由步骤(3)所制备的洁净干燥后的二氧化碳气体由管路通入外冷源冷却的深冷结晶器,在结晶器内逐渐凝固成雪花状固体干冰,再由造粒机挤压成型成为干冰颗粒,即为可挥发性清洗介质干冰颗粒;

(6) 可挥发性颗粒远距离气力输送工艺:以步骤(4)产生的低温气体为动力源,采用气力输送的方式,将步骤(5)中制备的可挥发性清洗介质干冰颗粒远距离吹送进清洗室中的喷射器,在喷射器内再引一路由步骤(4)产生的高压助推气体混合二次加速后,喷射出喷射器,在清洗室内喷向待清洗部件的表面完成清洗任务;

所述步骤(1)助推气体高压二氧化碳的压力为10-500bar。

2. 根据权利要求1所述的聚变堆热室清洗废气氧化分离再生利用方法,其特征在于:所述步骤(2)中经前置除尘过滤采用HEPA高效过滤器除尘,净化废气气体的同时,还能够实现对放射性颗粒进行收集,防止其扩散。

3. 根据权利要求1所述的聚变堆热室清洗废气氧化分离再生利用方法,其特征在于:所述步骤(2)中微热再生气体干燥器对吸收后的氚水可以再生,以备提取核燃料氚使用;使用时微热再生气体干燥过滤器一开一备,当水分接近20mg/L,则启用备份微热再生气体干燥

器,运行着的微热再生气体干燥器退出再生,再生时电加热器加热至250–300℃时氚水蒸气再生,当再生气出口温度≥120℃时,再生结束,水蒸气冷却到常温成液态供分离同位素核燃料使用。

4. 根据权利要求1所述的聚变堆热室清洗废气氧化分离再生利用方法,其特征在于:所述步骤(3)气态放射性杂质净化工艺中塔盘按照迷宫错流形式布置,塔盘内部装有加热器,依靠外部线路供电,加热塔盘内的固体氧化剂,进入高温氧化分离反应塔的混合气体中的二氧化碳不与固体氧化剂反应,而主要需要去除的杂质氢同位素氚会与固体氧化剂发生氧化还原反应,生成金属单质和水,大部分水蒸汽冷凝在高温氧化分离反应塔底部,通过氧化固定的形式实现二氧化碳和氢元素同位素气体的分离,极少量的水蒸气会被后续回路中的微热再生气体干燥器吸收之后再生,水蒸气冷却到常温后汇入废水罐槽贮存,液态废水供分离同位素核燃料氚使用,完成上述工序之后洁净干燥的二氧化碳气体进入缓冲罐内暂存。

5. 根据权利要求1所述的聚变堆热室清洗废气氧化分离再生利用方法,其特征在于:所述步骤(3)中的固体氧化剂包括CuO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、NiO、CoO、PbO、SnO<sub>2</sub>、In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、GeO、MoO<sub>3</sub>、MoO<sub>2</sub>、W<sub>2</sub>O<sub>3</sub>中的一种或多种组合。

6. 根据权利要求1所述的聚变堆热室清洗废气氧化分离再生利用方法,其特征在于:所述步骤(5)中深冷结晶器的深冷温度低于-90℃。

7. 一种聚变堆热室清洗废气氧化分离再生利用装置,其特征在于包括:清洗去污单元、固态、液态杂质过滤净化单元、气态放射性杂质氧化分离净化单元、低温动力气体制备单元、可挥发性颗粒再生单元、可挥发性颗粒远距离气力输送单元;

所述清洗单元包括:喷射器、包覆容器、运输装置和吹扫喷淋装置;喷射器与远距离气力输送单元中的低温气力输送器相连,运输装置和吹扫喷淋装置均在包覆容器内部,包覆容器为一密封部件,包覆容器外部为热室内环境,内腔体与固态、液态杂质过滤净化单元相连;清洗作业时,运输装置将待清洗部件运输至距离喷射器合适位置,经过干冰爆破清洗和高压气体吹扫后完成清洗作业,清洗作业所产生的废气通过管路输送至固态、液态杂质过滤净化单元;

所述固态、液态杂质过滤净化单元包括前置除尘过滤器、除油过滤器、微热再生气体干燥器、后置除尘过滤器和相关泵、阀;上述设备之间采用串联关系:前置除尘过滤器上级与清洗室相连,下级依次连接除油过滤器、微热再生气体干燥器、后置除尘过滤器和增压泵,清洗废气首先经过前置除尘过滤器除去放射性颗粒物,紧接着通过除油过滤器除去油脂类杂质,然后通过微热再生气体干燥器除去氚水,最后通过后置除尘过滤器再脱一次固态杂质,这其中微热再生气体干燥器可以再生出氚水供提取核燃料氚使用;

所述气态放射性杂质氧化分离净化单元包括混合废气缓冲罐、增压泵、氧化分离反应塔、压力传感器、温度传感器、放射性气体传感器、外部热源、微热再生气体干燥器、后置除尘过滤器、反流回路、成品气管路、冷凝水管路以及相关远程连锁控制阀;上述部件之间采取串联方式连接:混合废气缓冲罐上级连接固态、液态杂质过滤净化单元,下级连接增压泵、氧化分离反应塔,反应塔中部安置有塔盘的区域自上而下依次安置有压力传感器、温度传感器、放射性气体传感器,塔盘内部填料中预设有外部热源驱动的加热部件,反应塔主气路上分别连接着反流回路、成品气管路,其中反流回路连接至反应塔顶部,成品气管路依次

连接微热再生成气体干燥器和后置除尘过滤器，反应塔底部设置有冷凝水管路与放射性废液储罐相连接；上步工艺除去固态、液态杂质的混合气体中主要气态杂质放射性核燃料氚进入氧化分离反应塔之后与位于塔盘中的固体氧化剂填料进行250–500℃的高温反应，高温反应后主要的杂质气体氢的同位素氚被氧化成水，在氧化分离反应塔底部遇冷凝结成水蒸气后集聚在塔底，收集进入废液储罐集中存放待后处理，塔盘底部设有成分在线检测装置，不合格气体经反流回路返回反应塔顶部重新处理，合格成品气在出反应塔后再进行干燥得到，除尽氚水，得到洁净干燥的二氧化碳气体，之后进入储罐自然冷却备用；

所述低温动力气体制备单元包括二氧化碳气体缓冲罐、增压泵、低温高压气体储罐；上述设备采取依次串联方式连接：二氧化碳气体缓冲罐与上级气态放射性杂质氧化分离净化单元成品气管路相连，下级依次连接增压泵和低温高压气体储罐；上一步骤净化分离后洁净干燥的二氧化碳由管路输送进储罐进行暂存，在需要使用的时候，其中二氧化碳进入增压系统增压，降温之后，转化为低温动力气体为远距离气力输送和清洗时推送可挥发性颗粒干冰提供动力；

所述可挥发性颗粒再生单元包括深冷结晶罐、外冷源、干冰造粒机；上述设备依次串联：深冷结晶罐上级与低温动力气体制备单元二氧化碳气体缓冲罐相连，下级连接干冰造粒机，外冷源与深冷结晶罐中的换热盘管相连，将净化后的二氧化碳气体管路通过输送进深冷结晶罐，在外冷源的冷却作用下利用低温低压固化过程，将二氧化碳进一步迅速冷却，深冷温度低至-90℃甚至更低，通过旋转的叶片将冷凝的固态干冰甩离叶片后在重力的作用下滑落至容器底部，深冷结晶罐底部与干冰成型机相连接，通过螺旋输送机挤压通过模具成型后成为圆柱状胚件，之后通过两个带螺旋孔形模具的轧辊相互交叉配置，以相同方向旋转，带动圆形轧件反向旋转并前进，轧件在螺旋孔型作用下，直径压缩轴向延伸，轧制成所需的圆形颗粒；

所述可挥发性颗粒远距离气力输送单元包括低温气力输送器；低温气力输送器上级分别与可挥发性颗粒再生单元的干冰造粒机和低温动力气体制备单元的低温高压气体储罐相连，下级与清洗单元内的喷射器相连，工作时以制备的低温动力气体为动力利用气力输送的方式将前序步骤再生出的干冰颗粒，远距离输送进清洗室内的喷射器中，在喷射器混合室内再次与低温高压气体二次混合加速后，喷射进清洗室中的待清洗部件的污染表面完成清洗任务。

## 一种聚变堆热室清洗废气氧化分离净化再生利用方法及装置

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种热室内清洗废气氧化分离净化再生方法及设备,适用于聚变装置面向等离子体的内部活化及氚滞留内部器件热室内维护过程中的清洗去污过程中所产生的废气的处理,属于放射性污染控制和处理领域。

### 背景技术

[0002] 化石能源的逐渐耗竭已经是人所共知的事实,而风能、太阳能等可再生能源在目前来看,也无法完全满足人类对能源的需求。核能的发现利用及发展已经经历了大半个世纪,但是人类对裂变核能的安全利用仍就存在着一定程度的不确定性。随着ITER项目的进行,聚变能源得到更大的关注。同等质量的氢元素聚变产生的能量比铀等重元素裂变放出的能量大得多,而产生的辐射也少得多。对环境保护的考虑也是人们努力发展核聚变技术的原因之一。核聚变发电,是能源的明日之星。聚变能源也是目前公认的清洁、安全的下一代新能源,聚变装置的研究和发展近些年正在紧锣密鼓的进行当中,热室作为聚变堆内部器件的重要维护设施和安全应急的重要单元承担着重要的核安全重任,因而热室内相关的维护工艺工装设备的研发就显得尤为重要。

[0003] 现有的大量聚变实验装置在进行等离子体放电等聚变实验运行过程中在真空室内部均发现大量的放射性颗粒的产生,主要是由于各种真空室第一壁材料在高温和高辐照环境下材料的蒸发、肿胀、损伤以及粒子溅射等因素造成的,聚变堆运行的过程中内部器件会被14Mev的中子活化,并且作为核燃料的氚在高温环境下极易在材料中渗透、滞留,因此相关部件内的放射性和氚滞留给设备维护的人员和遥控操作装置带来了很大的危害。因此在热室内进行相关的维护工作之前需要将内部器件表面沾染的放射性颗粒和潜在的弱固性沾染物使用相关技术进行移除、收集、集中后固定收集处理。

[0004] 热室系统不同于一般设备的维护场所,其内部处理的均是高放射性的有毒有害物质,因此热室内的各种工艺十分复杂,需要综合考虑各方面因素,对整个工艺流程的各个环节均需要做到全过程管理,所有热室内部涉及的操作流程、引入的物质、反应的中间产物、最终产物、采用的装置、设备等均需要全生命周期管理和监控。目前还没有专门针对聚变堆内部器件活化材料和氚滞留部件的清洗去污的工艺方法,ITER(国际热核聚变试验堆)等大型聚变装置将干冰爆破清洗暂定为首选的清洗方案,但是相关资料表明热室的除氚系统没有办法处理大量二氧化碳气体,因此相关研究被迫搁置,急需设计一种可以处理干冰爆破清洗废气的处理工艺。

### 发明内容

[0005] 本发明技术解决问题:克服现有技术的不足,提供一种热室内清洗废气氧化分离净化再生方法及设备,解决了清洗介质固态二氧化碳(干冰)不能被热室除氚系统处理,实现了干冰爆破清洗能够应用在热室环境中,实现了高效清除收集内部器件表面的放射性颗粒的目的,防止了放射性颗粒扩散,实现清洗废物最少化的目的。

[0006] 本发明技术解决方案：一种聚变堆热室清洗废气氧化分离再生利用方法，其特点在于：利用废气中杂质成分氚易被氧化的特性，使用氧化剂将杂质氚氧化成氚水后利用干燥器吸收实现分离，将可再利用成分二氧化碳气体分别制成高压气体和固态二氧化碳干冰颗粒继续使用，实现步骤如下：

[0007] (1) 清洗去污工艺：将可挥发性清洗介质干冰颗粒在助推气体高压二氧化碳的助推下，喷射在待清洗表面，在碰撞待清洗表面的同时可挥发性颗粒破碎气化，撞击和挥发气化时产生的压力将清洗表面黏连附着的污染物与清洗表面分离，在密闭的清洗室内形成具有一定压力的载带着放射性颗粒的混合气体，可挥发性颗粒不断升华，使得清洗室内压力升高，之后以气流为依托，载带从污染表面清洗分离下的放射性颗粒离开清洗室，进入固态、液态杂质过滤净化工艺流程；

[0008] (2) 固态、液态杂质过滤净化工艺：对载带着放射性颗粒的混合气体首先进行前置除尘过滤，除去废气中的固体放射性颗粒的同时，集中收集防止其扩散，完成前置除尘过滤；再进行除油过滤处理，除去废气中夹杂的油脂类物质，之后进入微热再生气体干燥器除去混合气中的氚水蒸气，完成除水过滤，最后再经过后置除尘过滤二次过滤固态杂质；上述工艺完成后，混合气体完成了固态、液态相杂质的分离，剩下的混合气体中主要含有作为助推气体和清洗介质升华后的二氧化碳气体和需要除去的放射性核燃料氚以及微量的无害冷却剂氦和其他无害微量杂质（氦气、氮气等杂质气体对环境无影响不属于有害物质可留存）；

[0009] (3) 气态放射性杂质氧化分离净化工艺：对经过步骤(2)的前置除尘、除油、除水和后置除尘四重过滤后的混合气体中的放射性核燃料氚送入氧化分离反应塔，与位于塔盘中的固体氧化剂填料进行250—500℃的高温反应，高温反应后主要的杂质气体氢的同位素氚被氧化成水，在氧化分离反应塔底部遇冷凝结成水蒸气后集聚在塔底，收集进入废液储罐集中存放待后处理，塔盘底部设有成分在线检测装置，不合格气体经反流回路返回反应塔顶部重新处理，合格成品气在出反应塔后再进行干燥得到，除尽氚水，得到洁净干燥的二氧化碳气体，之后进入储罐自然冷却备用；

[0010] (4) 低温动力气体制备工艺：由步骤(3)分离净化后洁净干燥的二氧化碳经过增压形成高压气体，通过管路输送至高压储罐，冷却降温后转化为-20℃—50℃低温动力气体，在需要使用的时作为气力输送和清洗去污工艺中的动力源推送可挥发性清洗干冰颗粒，高压吹扫清洗室使用；

[0011] (5) 可挥发性颗粒再生工艺：由步骤(3)所制备的洁净干燥后的二氧化碳气体由管路通入外冷源冷却的深冷结晶器，在结晶器内逐渐凝固成雪花状固体干冰，再由造粒机挤压成型成为干冰颗粒，即为可挥发性清洗介质干冰颗粒；

[0012] (6) 可挥发性颗粒远距离气力输送工艺：以步骤(4)产生的低温气体为动力源，采用气力输送的方式，将步骤(5)中制备的可挥发性颗粒清洗介质干冰颗粒远距离吹送进清洗室中的喷射器，在喷射器内再引一路由步骤(4)产生的高压助推气体混合二次加速后，喷射出喷射器，在清洗室内喷向待清洗部件的表面完成清洗任务。

[0013] 所述步骤(1)助推气体高压二氧化碳的压力为10—500bar。

[0014] 所述步骤(2)中经前置除尘过滤采用HEPA高效过滤器除尘，净化废气气体的同时，还能够实现对放射性颗粒进行收集，防止其扩散。

[0015] 所述步骤(2)中微热再生气体干燥器对吸收后的氚水可以再生,以备提取核燃料氚使用。使用时微热再生气体干燥过滤器一开一备,当水分接近20mg/L,则启用备份微热再生气体干燥器,运行着的微热再生气体干燥器退出再生,再生时电加热器加热至250–300℃时氚水蒸气再生,当再生气出口温度≥120℃时,再生结束,水蒸气冷却到常温成液态供分离同位素核燃料使用。

[0016] 所述步骤(3)气态放射性杂质净化工艺中塔盘按照迷宫错流形式布置,塔盘内部装有加热器,依靠外部线路供电,加热塔盘内的固体氧化剂,进入高温氧化分离反应塔的混合气体中的二氧化碳不与固体氧化剂反应,而主要需要去除的杂质氢同位素氚会与固体氧化剂发生氧化还原反应,生成金属单质和水,大部分水蒸汽冷凝在高温氧化分离反应塔底部,通过氧化固定的形式实现二氧化碳和氢元素同位素气体的分离,极少量的水蒸气会被后续回路中的微热再生气体干燥器吸收之后再生,水蒸气冷却到常温后汇入废水罐槽贮存,液态废水供分离同位素核燃料氚使用,完成上述工序之后洁净干燥的二氧化碳气体进入缓冲罐内暂存。

[0017] 所述步骤(3)中的固体氧化剂包括CuO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、NiO、CoO、PbO、SnO<sub>2</sub>、In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、GeO、MoO<sub>3</sub>、MoO<sub>2</sub>、WO<sub>2</sub>中的一种或多种组合。

[0018] 所述步骤(5)中深冷结晶器的深冷温度低于-90℃。干冰颗粒的制备过程是:将净化后的二氧化碳气体通过低温冷凝固化过后制作成尺寸一定且密度均匀的干冰颗粒,利用低温冷凝固化过程,将净化后的二氧化碳进一步迅速冷却,深冷温度低至-90℃甚至更低,将二氧化碳气体输送至深冷结晶罐内,通过旋转的叶片将冷凝的固态干冰甩离叶片后在重力的作用下滑落至换热器底部,换热器底部与干冰造粒机相连接,压制出球形干冰颗粒。

[0019] 一种聚变堆热室清洗废气氧化分离净化再生利用装置,包括:清洗去污单元、固态、液态杂质过滤净化单元、气态放射性杂质氧化分离净化单元、低温动力气体制备单元、可挥发性颗粒再生单元、可挥发性颗粒远距离气力输送单元;

[0020] 所述清洗单元包括:喷射器、包覆容器、运输装置和吹扫喷淋装置;喷射器与远距离气力输送单元中的低温气力输送器相连,运输装置和吹扫喷淋装置均在包覆容器内部,包覆容器为一密封部件,覆容器外部为热室内环境,内腔体与固态、液态杂质过滤净化单元相连。清洗作业时,运输装置将待清洗部件运输至距离喷射器合适位置,经过干冰爆破清洗和高压气体吹扫后完成清洗作业,清洗作业所产生的废气通过管路输送至固态、液态杂质过滤净化单元;

[0021] 所述固态、液态杂质过滤净化单元包括前置除尘过滤器、除油过滤器、微热再生气体干燥器、后置除尘过滤器和相关泵、阀;上述设备之间采用串联关系:前置除尘过滤器上级与清洗室相连,下级依次连接除油过滤器、微热再生气体干燥器、后置除尘过滤器和增压泵,清洗废气首先经过前置除尘过滤器除去放射性颗粒物,紧接着通过除油过滤器除去油脂类杂质,然后通过微热再生气体干燥器除去氚水,最后通过后置除尘过滤器再脱一次固态杂质,这其中微热再生气体干燥器可以再生出氚水供提取核燃料氚使用;

[0022] 所述气态放射性杂质氧化分离净化单元包括混合废气缓冲罐、增压泵、氧化分离反应塔、压力传感器、温度传感器、放射性气体传感器、外部热源、微热再生气体干燥器、后置除尘过滤器、反流回路、成品气管路、冷凝水管路以及相关远程连锁控制阀;上述部件之间采取串联方式连接:混合废气缓冲罐上级连接固态、液态杂质过滤净化单元,下级连接增

压泵、氧化分离反应塔，反应塔中部安置有塔盘的区域自上而下依次安置有压力传感器、温度传感器、放射性气体传感器，塔盘内部填料中预设有外部热源驱动的加热部件，反应塔主气路上分别连接着反流回路、成品气管路，其中反流回路连接至反应塔顶部，成品气管路依次连接微热再生气体干燥器和后置除尘过滤器，反应塔底部设置有冷凝水管路与放射性废液储罐相连接；上步工艺除去固态、液态杂质的混合气体中主要气态杂质放射性核燃料氚进入氧化分离反应塔之后与位于塔盘中的固体氧化剂填料进行250–500℃的高温反应，高温反应后主要的杂质气体氢气的同位素氚被氧化成水，在氧化分离反应塔底部遇冷凝结成水蒸气后集聚在塔底，收集进入废液储罐集中存放待后处理，塔盘底部设有成分在线检测装置，不合格气体经反流回路返回反应塔顶部重新处理，合格成品气在出反应塔后再进行干燥得到，除尽氚水，得到洁净干燥的二氧化碳气体，之后进入储罐自然冷却备用；

[0023] 所述低温动力气体制备单元包括二氧化碳气体缓冲罐、增压泵、低温高压气体储罐；上述设备采取依次串联方式连接：二氧化碳气体缓冲罐与上级气态放射性杂质氧化分离净化单元成品气管路相连，下级依次连接增压泵和低温高压气体储罐；上一步骤净化分离后洁净干燥的二氧化碳由管路输送进储罐进行暂存，在需要使用的时候，其中二氧化碳进入增压系统增压，降温之后，转化为低温动力气体为远距离气力输送和清洗时推送可挥发性颗粒干冰提供动力；

[0024] 所述可挥发性颗粒再生单元包括深冷结晶罐、外冷源、干冰造粒机；上述设备依次串联：深冷结晶罐上级与低温动力气体制备单元包二氧化碳气体缓冲罐相连，下级连接干冰造粒机，外冷源与深冷结晶罐中的换热盘管相连，将净化后的二氧化碳气体管路通过输送进深冷结晶罐，在外冷源的冷却作用下利用低温低压固化过程，将二氧化碳进一步迅速冷却，深冷温度低至-90℃甚至更低，通过旋转的叶片将冷凝的固态干冰甩离叶片后在重力的作用下滑落至容器底部，深冷结晶罐底部与干冰成型机相连接，通过螺旋输送机挤压通过模具成型后成为圆柱状胚件，之后通过两个带螺旋孔形模具的轧辊相互交叉配置，以相同方向旋转，带动圆形元件反向旋转并前进，元件在螺旋孔型作用下，直径压缩轴向延伸，轧制成所需的圆形颗粒；

[0025] 所述可挥发性颗粒远距离气力输送单元包括低温气力输送器；低温气力输送器上级分别与可挥发性颗粒再生单元的干冰造粒机和低温动力气体制备单元的低温高压气体储罐相连，下级与清洗单元内的喷射器相连。工作时以制备的低温动力气体为动力利用气力输送的方式将前序步骤再生出的干冰颗粒，远距离输送进清洗室内的喷射器中，在喷射器混合室内再次与低温高压气体二次混合加速后，喷射进清洗室中的待清洗部件的污染表面完成清洗任务。

[0026] 本发明与现有的技术相比的有益效果是：

[0027] (1) 本发明是基于氧化分离的方法，集中低危害化处理含有高危放射性颗粒和活泼放射性气体的热室清洗废气和清洗介质再生利用的工艺。相比于现有将清洗废气作为废弃物不加回收直接排入热室内环境的技术方案，本发明利用热室内部相对封闭清洗室来限制清洗废气在热室内的扩散，将其回收并加以利用，将废气与热室内的环境相隔绝，从而解决干冰爆破清洗由于清洗介质固态干冰颗粒主要成分CO<sub>2</sub>及含有大量CO<sub>2</sub>成分清洗废气由于热室除氟系统不能处理而不能使用在热室内清洗去污的难题。

[0028] (2) 本发明是基于氧化分离的方法利用主要杂质氚易被氧化成水的化学性质，将

其氧化后吸收实现分离,所需设备及反应条件简单易行,不需要复杂的外部辅助设备,所需设备维护周期长甚至免维护,适合人员不能进入的热室内高放射高危环境的远程遥操作。

[0029] (3) 本发明利用原有清洗废气,实现放射性颗粒和残留放射性气体与清洗介质的分类收集和分离,解决了热室除氚系统不能够处理二氧化碳气体和放射性废物最少化的难题。保障清洗废气不作为放射性流出物污染环境的同时,还能够有效收集和回收放射性颗粒和气态核燃料氚,并且使得原用清洗介质回收循环使用,实现清洗去污工艺中废物最少化和副产物分类化,方便放射性废物后处理。

[0030] (4) 采用低温-20℃—50℃动力气体作为动力源的远距离气力输送技术,可以实现固态干冰颗粒远距离输送,解决干冰在密闭容器中储存易爆和不能密封存储的问题,同时兼顾了热室环境中作为清洗介质的干冰颗粒远距离运输和存放不能外泄的难题。

## 附图说明

[0031] 图1为本发明的聚变堆热室清洗废气氧化分离净化再生利用方法工艺流程图;

[0032] 图2为本发明的聚变堆热室清洗废气氧化分离净化再生利用装置结构图。

[0033] 图中:1. 清洗单元 2. 前置除尘过滤器 3. 液态二氧化碳补充 4. 除油过滤器 5. 氚水处理 6. 放射性废液储罐 7. 冷凝水管路 8. 微热再生成气体干燥器 9. 后置除尘过滤器 10. 再生氚水管路 11. 增压泵 12. 增压泵 13. 外部热源 14. 混合废气缓冲罐 15. 氧化分离反应塔 16. 塔盘 17. 废气处理 18. 压力传感器 19. 温度传感器 20. 放射性气体传感器 21. 反流回路 22. 成品气管路 23. 微热再生成气体干燥器 24. 后置除尘过滤器 25. 二氧化碳气体缓冲罐 26. 增压泵 27. 低温高压气体储罐 28. 高压气态二氧化碳补充 29. 深冷结晶罐 30. 低温气力输送器 31. 干冰造粒机 32. 外冷源。

## 具体实施方式

[0034] 为了更加清楚表述本发明的目的、技术方案及优点,以下结合附图及实施例,对本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。

[0035] 如图1所示,待清洗部件由遥操作装置转运至热室清洗单元内,运输装置将待清洗的部件运输至喷射器下方,喷射器喷射出高速干冰颗粒,将待清洗部件表面粘连和弱固性污染物与基体分离,完成一次清洗任务后对清洗单元内部进行气体喷淋吹扫,清洗后的带尘废气,依次经过前置除尘过滤器过滤下固态放射性颗粒,防止其扩散;除油过滤器除去废气中存在的油脂类物质,防止降低后续干燥器性能;微热再生成气体干燥器除去废气中存在的氚水蒸汽,利用其可再生特性,再生出氚水收集后提取核燃料氚,干燥器双路配置,使用时微热再生成气体干燥过滤器一开一备,当水分接近20mg/L,则启用备份微热再生成气体干燥器,运行着的微热再生成气体干燥器退出再生,再生时电加热器加热至250-300℃时氚水蒸气再生,当再生气出口温度≥120℃时,再生结束,水蒸气冷却到常温成液态供分离同位素核燃料使用。最后再经过后置除尘过滤器进行二次过滤提高过滤效果;上述工艺过程完成固、液态杂质的分离,过滤后的废气进入混合废气缓冲罐暂存,之后进入气态放射性杂质氧化分离净化工艺。固、液态杂质分离后的干燥混合废气进入氧化分离反应塔,反应塔内部设置有装有足量氧化剂填料的塔盘,按照迷宫错流形式布置,塔盘内部装有加热装置,其依靠外

部热源加热塔盘内的氧化剂，进入氧化分离塔的混合废气中的二氧化碳不与氧化剂发生反应，而作为主要杂质气体需要去除的氢同位素气体氚会与氧化剂发生氧化还原反应，生成金属单质和氚水，氚水在氧化分离反应塔底部遇冷凝结成水蒸气后集聚在塔底，收集进入废液储罐集中存放待后处理，塔盘底部设有成分在线检测装置，不合格气体经反流回路返回反应塔顶部重新处理，合格成品气在出反应塔后再进行干燥得到，除尽氚水。极少量的水蒸气会被后续回路中的微热再生干燥器吸收，干燥器双路配置，使用时微热再生气体干燥过滤器一开一备，当水分接近 $20\text{mg/L}$ ，则启用备份微热再生气体干燥器，运行着的微热再生气体干燥器退出再生，再生时电加热器加热至 $250\text{--}300^\circ\text{C}$ 时氚水蒸气再生，当再生气体出口温度 $\geq 120^\circ\text{C}$ 时，再生结束，水蒸气冷却到常温成液态供分离同位素核燃料使用。完成上述工艺步骤之后得到洁净干燥的二氧化碳气体，进入二氧化碳气体缓冲罐自然冷却备用。其中一部分净化后洁净干燥的二氧化碳气体进入增压系统增压，降温之后，转化为低温动力气体，为远距离气力输送和清洗时推送可挥发性颗粒干冰提供动力。另一部分净化后洁净干燥的二氧化碳气体被制作成尺寸一定且密度均匀的干冰颗粒，利用低温低压固化过程，将二氧化碳进一步迅速冷却，深冷温度低至 $-90^\circ\text{C}$ 甚至更低，将净化祛杂后的二氧化碳输送至快速深冷换热器内，通过旋转的叶片将冷凝的固态干冰甩离叶片后在重力的作用下滑落至容器底部，换热器底部与干冰成型机相连接，通过螺旋输送机挤压通过模具成型后成为圆柱状胚件，之后通过两个带螺旋孔形模具的轧辊相互交叉配置，以相同方向旋转，带动圆形轧件反向旋转并前进，轧件在螺旋孔型作用下，直径压缩轴向延伸，轧制成所需的圆形颗粒。通过螺旋输送机挤压通过模具成型后成为圆柱状胚件，之后通过两个带螺旋孔形模具的轧辊相互交叉配置，以相同方向旋转，坯料被咬入到同向旋转的轧辊后，旋转的螺旋轧辊使轧件一边旋转，一边成形、前进，即轧件一边成形，一边呈螺旋式前进，轧件在螺旋孔型作用下，直径压缩轴向延伸，轧制成所需的圆形颗粒。最终以制备的低温高压气力为动力源采用气力输送的方式，将成型的干冰颗粒远距离输送进清洗室内的喷射器中，在喷射器混合室内与高压气体混合加速后，以极高的速度喷射进清洗室内喷射在待清洗部件的表面完成清洗任务。

[0036] 如图2所示，聚变堆热室清洗废气氧化分离净化再生利用装置包括清洗单元、固体颗粒过滤净化单元、气态放射性杂质净化单元、低温动力气体制备单元、可挥发性颗粒再生单元、可挥发性颗粒远距离气力输送单元。

[0037] 清洗单元包括：喷射器、包覆容器、运输装置和吹扫喷淋装置；喷射器与远距离气力输送单元中的低温气力输送器相连，运输装置和吹扫喷淋装置均在包覆容器内部，包覆容器为一密封部件，包覆容器外部为热室内环境，内部与固态、液态杂质过滤净化单元相连。

[0038] 固态、液态杂质过滤净化单元包括前置除尘过滤器2、除油过滤器4、微热再生气体干燥器8、后置除尘过滤器9和相关泵、阀；上述设备之间采用串联关系：前置除尘过滤器2上一级与清洗室相连，下级依次连接除油过滤器4、微热再生气体干燥器8、后置除尘过滤器9和增压泵11。

[0039] 气态放射性杂质氧化分离净化单元包括混合废气缓冲罐14、增压泵12、氧化分离反应塔15、压力传感器18、温度传感器19、放射性气体传感器20、外部热源13、微热再生气体干燥器23、后置除尘过滤器24、反流回路21、成品气管路22、冷凝水管路以及相关远程连锁

控制阀；上述设备之间采取串联方式连接：混合废气缓冲罐14上级连接固态、液态杂质过滤净化单元，下级连接增压泵12、氧化分离反应塔15，氧化分离反应塔15中部安置有塔盘16的区域自上而下依次安置有压力传感器18、温度传感器19、放射性气体传感器20，塔盘16内部填料中预设有外部热源13驱动的加热部件，氧化分离反应塔15主气路上分别连接着反流回路21、成品气管路22，其中反流回路21连接至反应塔顶部，成品气管路依次连接微热再生气体干燥器23和后置除尘过滤器24，氧化分离反应塔15底部设置有冷凝水管路7与放射性废液储罐6相连接。

[0040] 低温动力气体制备单元包括二氧化碳气体缓冲罐25、增压泵26、低温高压气体储罐27；上述设备采取串联方式连接：二氧化碳气体缓冲罐25与上级气态放射性杂质氧化分离净化单元成品气管路相连，下级依次连接增压泵26和低温高压气体储罐27。

[0041] 可挥发性颗粒再生单元包括深冷结晶罐29、外冷源32、干冰造粒机31；上述设备依次串联：深冷结晶罐29上级与低温动力气体制备单元二氧化碳气体缓冲罐25相连，下级连接干冰造粒机31，外冷源32与深冷结晶罐29中的换热盘管相连。

[0042] 可挥发性颗粒远距离气力输送单元包括低温气力输送器30；气力输送器30上级分别与可挥发性颗粒再生单元的干冰造粒机30和低温动力气体制备单元的低温高压气体储罐27相连，下级与清洗单元1内的喷射器相连。

[0043] 待清洗部件由遥操作装置转运至清洗单元1内由喷射器喷射出干冰颗粒进行爆破清洗，将待清洗部件表面粘连和弱固性污染物和活化材料与基体分离，完成一次清洗任务后吹扫喷淋装置将整个包覆容器内部进行气体喷淋吹扫，完成清洗流程；清洗后的带尘废气，分别经过前置除尘过滤器2、除油过滤器4、微热再生气体干燥器8、后置除尘过滤器9完成固态、液态杂质的分离，其中微热再生气体干燥器8吸收及再生环节如下：干燥器双路配置，工作时一开一备，当水分接近 $20\text{mg/L}$ ，启用备份干燥器，运行干燥器退出再生。(再生时电加热器加热至 $250\text{--}300^\circ\text{C}$ 时进行再生，当再生气出口温度 $\geq 120^\circ\text{C}$ 时，再生结束，水蒸气汇入放射性废液储罐6贮存，最终通过氚水处理5供分离同位素核燃料使用，其余部分做相应处理后达到清洁解控标准后排放。除尘、除油、除水过滤之后，纯气态的混合气体通过增压泵11增压进入混合废气缓冲罐14暂存，之后经增压泵12增压进入氧化分离反应塔15，反应塔内部设置有装有足量CuO填料的塔盘16，按照迷宫错流形式布置，塔盘内部装有外热源13，其依靠外部线路供电加热塔盘16内的氧化剂，进入反应塔的混合废气中的二氧化碳不与氧化剂反应，主要杂质气体需要去除的氢同位素气体氚会与氧化剂发生氧化还原反应，生成金属单质和水，所生成的水蒸汽大部分会冷凝在反应塔底部，通过冷凝水管路7，进入放射性废液储罐6储存，反应塔内塔盘区域上部设有压力传感器18，中部设有温度压力传感器19，中下部迷宫式塔盘出口处设有放射性气体传感器20，当放射性气体传感器20处气体净化不达标即氚没有氧化完全时候，通过反流回路21将处理过的不合格气体返回反应塔顶部重新氧化净化，合格的气体会通过成品气管路22流出氧化分离反应塔15，合格气体中可能会夹杂少量没有冷凝完全的水蒸气，极少量的水蒸气会被后续回路中的微热再生气体干燥器23吸收，干燥器双路配置，工作时一开一备，当水分接近 $20\text{mg/L}$ ，启用备份干燥器，运行干燥器退出再生。(再生时电加热器加热至 $250\text{--}300^\circ\text{C}$ 时进行再生，当再生气出口温度 $\geq 120^\circ\text{C}$ 时，再生结束，水蒸气汇入放射性废液储罐6贮存，最终通过氚水处理5供分离同位素核燃料使用，其余部分做相应处理后达到清洁解控标准后排放。完成上述工序之后洁净干

燥的二氧化碳气体经过后置除尘过滤器24过滤后进入二氧化碳气体缓冲罐25内暂存。一部分净化后的二氧化碳气体通过增压泵26加压后进入低温高压气体储罐27内降温暂存。另一部分二氧化碳气体进入深冷结晶罐29，在外冷源32驱动的换热盘管完成换热后，在冷凝离心叶片上冷凝成雪花状干冰后，在离心力作用下甩离叶片，沿容器避下滑至换热器底部，在干冰造粒机的螺旋输送机内压缩成型后经过干冰造粒机的颗粒轧机轧制成需要的干冰颗粒，最终通过低温气力输送器30内来自高压气体储罐27内的高压气体的吹送下，输送至清洗室1内的执行清洗作业，至此完成所有的净化再生流程。整个系统可以通过液态二氧化碳补充3和高压气态二氧化碳补充28处进行补充二氧化碳的损耗。

[0044] 此外由于氚密度较小，长期积累会在氧化分离反应塔15顶部聚集，因此塔顶预留管路通过废气处理17，可以将塔内残余氚处理干净，避免反应塔维护和补充填料时造成操作人员内辐照。

[0045] 本发明适用于热室内核环境下的清洗废气净化再生工艺，尤其是针对聚变堆热室除氚系统不能够处理二氧化碳，实现清洗废物最少化和废物分类的遥操作清洗作业。

[0046] 本发明的氧化分离废气处理装置的实施例反应塔内填装的固体CuO，包括但是不仅限于CuO，也已包括其他可行的氧化物例如：CuO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、NiO、CoO、PbO、SnO<sub>2</sub>、In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、GeO、MoO<sub>3</sub>、MoO<sub>2</sub>、W<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，此外填充相应氧化剂的填料的加热温度也随所填的氧化剂的种类做相应的改变。反应塔内部可以只装填一种或者多种相关固体氧化剂。

[0047] 总之，本发明利用氧化分离的方法低危化处理含有放射性颗粒和放射性气体的核聚变装置热室内清洗废弃物的无害化处理和清洗介质再生循环利用，利用原有清洗废气中杂质易被氧化的特性，将主要杂质氧化成氚水，之后吸收实现杂质的分离，最终实现废气中放射性颗粒和残留放射性气体与清洗介质的分类收集和分离。成功解决了热室内放射性废物最少化的难题。保障清洗废气不作为放射性流出物污染环境的同时，还能够有效收集放射性颗粒和气态核燃料，并且使得原用清洗介质回收循环使用。

[0048] 以上所述仅为本发明的较佳实施例而已，并不用以限制本发明，凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等，均应包含在本发明的保护范围之内。

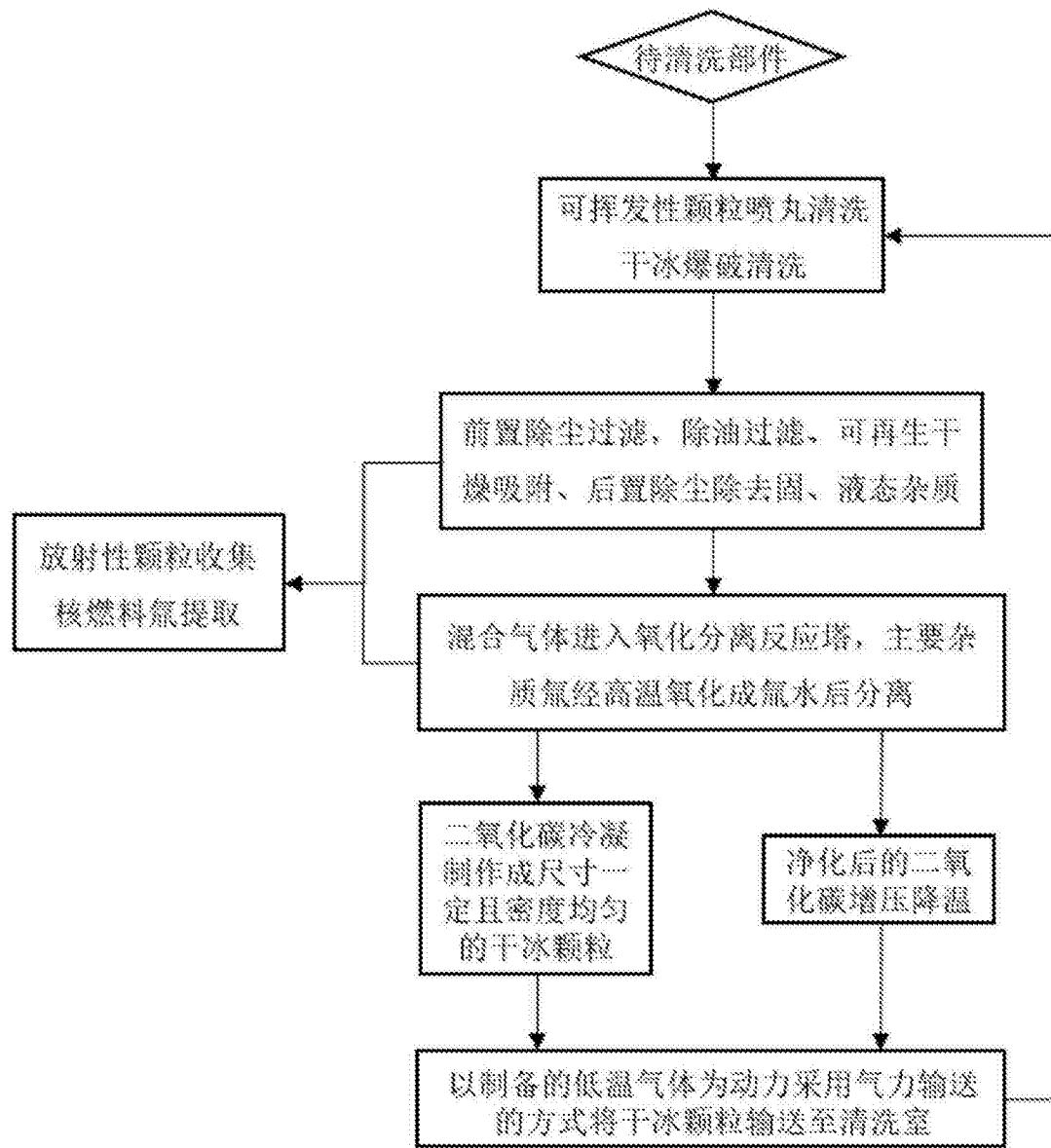


图1

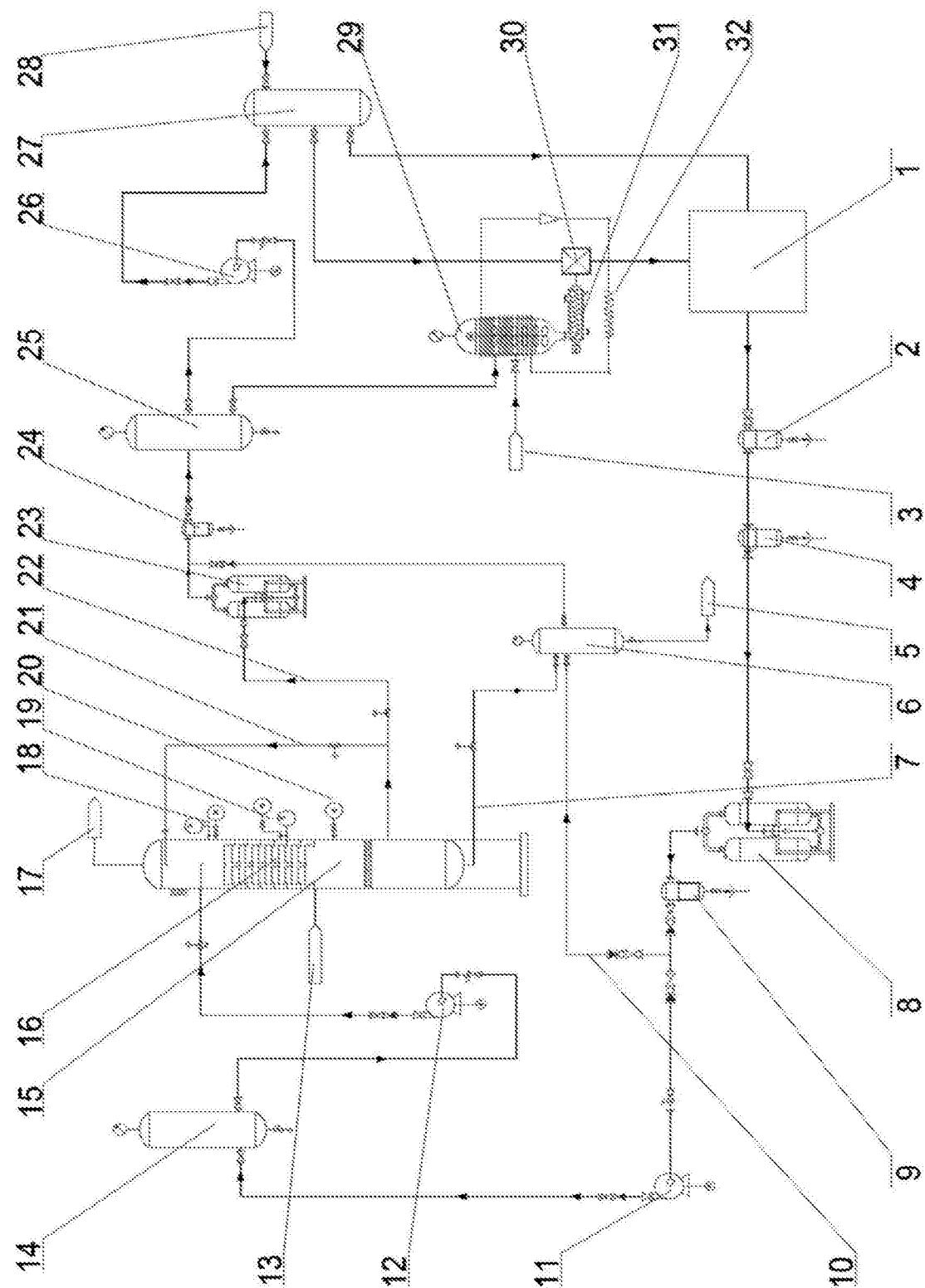


图2