



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 116216632 B

(45) 授权公告日 2025. 03. 21

(21) 申请号 202310059199.4

B01J 19/18 (2006.01)

(22) 申请日 2023.01.20

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 115508518 A, 2022.12.23

申请公布号 CN 116216632 A

CN 104974713 A, 2015.10.14

CN 102515093 A, 2012.06.27

(43) 申请公布日 2023.06.06

邓灿等. H<sub>2</sub>-THF水合物形成过程研究.《武汉理工大学学报》.2010,第32卷(第5期),第45-49页.

(73) 专利权人 清华大学深圳国际研究生院

地址 518055 广东省深圳市南山区西丽街道深圳大学城清华校区A栋二楼

Zhang, JB 等. Coupling amino acid L-Val with THF for superior hydrogen hydrate kinetics: Implication for hydrate-based hydrogen storage.《CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL》.2023,第467卷第1-3页.

(72) 发明人 殷振元 张继宝 李艳

审查员 唐大海

(74) 专利代理机构 深圳新创友知识产权代理有限公司 44223

专利代理师 江耀锋

(51) Int. Cl.

C01B 3/00 (2006.01)

B01J 19/00 (2006.01)

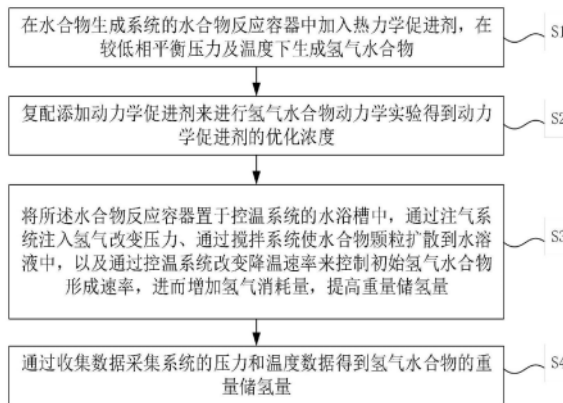
权利要求书1页 说明书7页 附图4页

(54) 发明名称

一种提高氢气水合物重量储氢量的方法

(57) 摘要

本发明公开了一种提高氢气水合物重量储氢量的方法,包括:在水合物反应容器中加入热力学促进剂,在较低相平衡压力及温度下生成氢气水合物;复配添加动力学促进剂来进行氢气水合物动力学实验得到动力学促进剂的优化浓度;将其置于控温系统的水浴槽中,通过注气系统注入氢气改变压力、通过搅拌系统使水合物颗粒扩散到水溶液中,以及通过控温系统改变降温速率来控制初始氢气水合物形成速率,进而增加氢气消耗量,提高重量储氢量;通过压力和温度数据得到氢气水合物的重量储氢量。本发明实现长期非爆炸性储存;还大大加快氢气水合物生成速率,实现重量储氢量的最大化。



1. 一种提高氢气水合物重量储氢量的方法,其特征在于,包括如下步骤:

S1、在水合物生成系统的水合物反应容器中加入热力学促进剂,所述热力学促进剂为四氢呋喃THF,化学计量浓度为0.1mol%~6.0 mol%,在较低相平衡压力及温度下生成氢气水合物,所述较低相平衡压力为0.3 MPa-13.3 MPa,温度为277.6 K -284.6 K;

S2、复配添加动力学促进剂来进行氢气水合物动力学实验得到动力学促进剂的优化浓度;所述动力学促进剂为缬氨酸,浓度为0.3 wt%;

S3、将所述水合物反应容器置于控温系统的水浴槽中,通过注气系统注入氢气改变压力、通过搅拌系统使水合物颗粒扩散到水溶液中,以及通过控温系统改变降温速率来控制初始氢气水合物形成速率,降温速率为0.01 K/min~0.5 K/min,进而增加氢气消耗量,提高重量储氢量;

S4、通过收集数据采集系统的压力和温度数据得到氢气水合物的重量储氢量。

2. 如权利要求1所述的提高氢气水合物重量储氢量的方法,其特征在于,步骤S4中,所述氢气水合物的重量储氢量为0.20 wt%~0.30 wt%。

## 一种提高氢气水合物重量储氢量的方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及氢能存储领域,特别是涉及一种提高氢气水合物重量储氢量的方法及装置。

### 背景技术

[0002] 氢能是非常重要的二次能源,它质量轻,能量密度高,来源广泛,除此之外,氢能还是一种清洁、对环境友好的能源,被称为21世纪的理想能源。现阶段,氢能已经和可再生能源一起作为新能源发展的主要方向。氢能的利用可以分为三个部分:制氢、储氢、氢气运输。氢能被应用的前提是制氢,而储氢是制约氢能发展的重要环节。目前缺少的是能耗低安全性能高的储氢方式,因此高效安全的储氢方式变成了一个重要的研究课题。

[0003] 研究较多的储氢技术有高压气态储罐储氢、低温液态储氢,这两种技术都面临着能耗高,存在泄露安全隐患;一些固态储氢方式,比如金属氢化物储氢、多孔材料吸附储氢等,金属氢化物可能会导致环境问题,并且放氢速率低,储氢材料循环差,而利用多孔介质物理吸附,吸附材料成本高,吸附需要的温度较低,能耗高。水合物储氢是一种新型的储氢技术,该技术操作简单,安全性高,对环境没有负面影响,除此之外,它通过分解水合物可以很容易得到氢气,并且分解所需要的能耗较低,储氢量也比较可观。对于生成的氢气水合物可以在低于生成水合物的压力下保存,可以实现较高压力生成和低压保存,便于氢能的运输。但目前氢气水合物生成所需要的压力范围还是较高,水合物法储氢量还是处于理论值,实验储氢量需要提高。

### 发明内容

[0004] 为了解决如何降低氢气水合物生成压力,加快氢气水合物生成速率以及提高氢气水合物重量储氢量的技术问题,本发明的首要目的在于提供一种提高氢气水合物重量储氢量的方法。

[0005] 本发明的再一目的是提供一种实现上述提高氢气水合物重量储氢量的方法的装置。

[0006] 本发明通过如下技术方案加以实现:

[0007] 一种提高氢气水合物重量储氢量的方法,包括如下步骤:

[0008] S1、在水合物生成系统的水合物反应容器中加入热力学促进剂,在较低相平衡压力及温度下生成氢气水合物;

[0009] S2、复配添加动力学促进剂来进行氢气水合物动力学实验得到动力学促进剂的优化浓度;

[0010] S3、将所述水合物反应容器置于控温系统的水浴槽中,通过注气系统注入氢气改变压力、通过搅拌系统使水合物颗粒扩散到水溶液中,以及通过控温系统改变降温速率来控制初始氢气水合物形成速率,进而增加氢气消耗量,提高重量储氢量;

[0011] S4、通过收集数据采集系统的压力和温度数据得到氢气水合物的重量储氢量。

[0012] 在一些实施例中,步骤S1中,所述热力学促进剂选自气体热力学促进剂或者液体热力学促进剂;其中,所述气体热力学促进剂选自丙烷 $C_3H_8$ 或者二氧化碳 $CO_2$ ;所述液体热力学促进剂选自四氢呋喃THF、1,3 二氧戊烷DIOX、环戊烷CP、四丁基溴化铵 TBAB、四丁基硝酸铵 $TBANO_3$ 中的一种或几种。

[0013] 在一些实施例中,步骤S1中,所述较低相平衡压力为0.3 MPa-13.3MPa,温度为277.6 K -284.6 K;所述热力学促进剂的化学计量浓度为0.1mol%~6.0 mol%。

[0014] 在一些实施例中,步骤S2中,所述动力学促进剂选自氨基酸动力学促进剂或者氨基酸动力学促进剂与多孔介质耦合;其中,所述多孔介质选自活性炭、碳纳米材料、石墨烯中的一种或几种;所述氨基酸动力学促进剂选自缬氨酸、蛋氨酸、亮氨酸中的一种或几种。

[0015] 在一些实施例中,步骤S2中,所述氨基酸动力学促进剂的优化浓度为0.01wt%~1wt%,优选为0.1wt%~0.5wt%,更优选为0.3wt%。

[0016] 在一些实施例中,步骤S3中,所述水浴槽的水浴温度为273.15K~280 K。

[0017] 在一些实施例中,步骤S3中,所述氢气改变压力的压力范围为10 MPa~14 MPa;所述搅拌系统的搅拌速率为550 rpm~650 rpm。

[0018] 在一些实施例中,步骤S3中,所述降温速率为0.01 K/min~0.5 K/min。

[0019] 在一些实施例中,步骤S4中,所述氢气水合物的重量储氢量为0.20 wt%~0.30 wt%。

[0020] 本发明还提供了一种实现提高氢气水合物重量储氢量的装置,包括:

[0021] 用于注入氢气和/或氧气的注气系统,包括高压气瓶,所述高压气瓶以及柱塞泵均连接在活塞容器上,所述活塞容器上设有压力表;

[0022] 用于生成含氢混合水合物的水合物生成系统,包括通过所述活塞容器7和柱塞泵连接的水合物反应容器,所述水合物反应容器为半可视带搅拌反应釜,在顶部以及左右侧开有视窗;在所述视窗右侧设置有 CCD摄像机;

[0023] 用于促进水合物成核的搅拌系统,包括设置在所述水合物反应容器底部的磁力转子和磁力搅拌器;

[0024] 用于控制升降温速率的控温系统,包括放置有所述水合物反应容器的水浴槽,所述水浴槽连接程序控温循环水浴;

[0025] 以及用于收集温度和压力数据的数据采集系统,包括采集得到所述水合物反应容器内部温度和压力的热电偶和压力传感器。

[0026] 本发明与现有技术对比的有益效果包括:

[0027] 本发明先通过加入特定化学计量浓度的热力学促进剂,在较低相平衡压力使生产的含氢水合物有着适度的形成和储存条件,并且水合物法储氢可以实现长期非爆炸性储存;再复配添加动力学促进剂并其优化浓度;然后通过改变降温速率来控制初始氢气水合物形成速率,可以大大加快氢气水合物生成速率,实现重量储氢量的最大化。

[0028] 在一些实施例中,本发明通过在水合物生成系统的水合物反应容器上开有三个视窗,可以观察到水合物晶体侧面以及顶部生长形貌变化,并通过数据采集系统设置的热电偶,可以同时测得水合物反应容器中不同位置处温度的变化,确定水合物反应放热对温度的影响;且所述水合物反应容器的反应釜装置带有搅拌,通过搅拌可以增大气液接触面积,进而能够加快氢气水合物生成以及提高重量储氢量。

[0029] 本发明实施例中的其他有益效果将在下文中进一步述及。

### 附图说明

[0030] 图1是本发明实施例提出的提高氢气水合物重量储氢量的方法的流程图；

[0031] 图2是本发明实施例提出的提高氢气水合物重量储氢量的装置的示意图；

[0032] 图3a是本发明实施例的反应容器的纵向剖面图；

[0033] 图3b是本发明实施例的反应容器的俯视图；

[0034] 图4是本发明实施例中不同缬氨酸浓度以及四氢呋喃下的氢气消耗量示意图；

[0035] 图5是本发明实施例中不同缬氨酸浓度以及四氢呋喃下的重量储氢量示意图；

[0036] 图6是本发明实施例中不同氢气和四氢呋喃水合物系统下重量储氢量对比示意图；

[0037] 附图标记如下：

[0038] 1-水合物反应容器,2-视窗,3-水浴槽,4-磁力转子,5-磁力搅拌器,6-程序控温循环水浴,7-活塞容器,8-柱塞泵,9-高压气瓶,10-压力表,11-热电偶,12-压力传感器,13-数据采集系统,14- CCD(电荷耦合器件)摄像机。

### 具体实施方式

[0039] 下面对照附图并结合优选的实施方式对本发明作进一步说明。需要说明的是,在不冲突的情况下,本申请中的实施例及实施例中的特征可以相互组合。

[0040] 需要说明的是,本实施例中的左、右、上、下、顶、底等方位用语,仅是互为相对概念,或是以产品的正常使用状态为参考的,而不应该认为是具有限制性的。

[0041] 对于如何降低氢气水合物生成压力,加快氢气水合物生成速率,提高储氢量是解决水合物法储氢难题的关键。

[0042] 本发明实施例提出了一种提高氢气水合物重量储氢量的方法,如图1所示,包括如下步骤：

[0043] S1、在水合物生成系统的水合物反应容器中加入热力学促进剂,在较低相平衡压力及温度下生成氢气水合物；

[0044] 其中热力学促进剂选自气体热力学促进剂或者液体热力学促进剂；其中,气体热力学促进剂选自丙烷 $C_3H_8$ 或者二氧化碳 $CO_2$ ；液体热力学促进剂选自四氢呋喃THF、1,3 二氧戊烷DIOX、环戊烷CP、四丁基溴化铵 TBAB、四丁基硝酸铵 $TBANO_3$ 中的一种或几种。

[0045] 在一些实施例中,所述较低相平衡压力为0.3 Mpa-13.3MPa,温度为277.6 K - 284.6 K；所述热力学促进剂的化学计量浓度为0.1 mol%~6 mol%。

[0046] S2、复配添加动力学促进剂来进行水合物动力学实验得到动力学促进剂的优化浓度；

[0047] 其中动力学促进剂选自氨基酸动力学促进剂或者氨基酸动力学促进剂与多孔介质耦合；其中,多孔介质选自活性炭、碳纳米材料、石墨烯中的一种或几种；氨基酸动力学促进剂选自缬氨酸、蛋氨酸、亮氨酸中的一种或几种。

[0048] 在一些实施例中,步骤S2中,氨基酸动力学促进剂的优化浓度为0.01wt%~1wt%,优选为0.1wt%~0.5wt%,更优选为0.3wt%。

[0049] S3、将所述水合物反应容器置于控温系统的水浴槽中,通过注气系统注入氢气改变压力、通过搅拌系统使水合物颗粒扩散到水溶液中,以及通过控温系统改变降温速率来控制初始氢气水合物形成速率;

[0050] 其中水浴槽的水浴温度为273.15K~280K;所述氢气改变压力的压力范围为10 MPa~14 MPa;所述搅拌系统的搅拌速率为550 rpm~650 rpm;降温速率为0.02K/min~0.3 K/min。

[0051] S4、通过收集数据采集系统的压力和温度数据得到氢气水合物的重量储氢量;

[0052] 其中氢气水合物的重量储氢量为0.20 wt%~0.30wt%。

[0053] 本发明实施例提出了一种提高氢气水合物重量储氢量的装置及方法,可以提高水合物法储氢量。在氢气水合物生成中加入热力学促进剂四氢呋喃或1,3 二氧戊烷可以改变相平衡条件,在较低相平衡压力及温度的条件下生成氢气水合物,其中所述较低相平衡压力为0.3 MPa-13.3 MPa,温度为277.6 K -284.6 K,并且在此基础上,添加动力学促进剂氨基酸(缬氨酸,蛋氨酸,亮氨酸等)来加快氢气水合物生成动力学,优化不同氨基酸浓度,得到最优浓度,并采用不同降温速率生成水合物法来控制初始氢气水合物形成速率,进而提高氢气水合物转化率和增加储氢量。

[0054] 其中较低相平衡压力为0.3 MPa-13.3MPa,温度为277.6 K -284.6 K;

[0055] 获取不同氨基酸浓度的方法是通过复配5.56mol%促进剂(THF,DIOX等)和氨基酸(缬氨酸,蛋氨酸,亮氨酸等)来进行水合物动力学实验,得到诱导时间短,氢气耗气量高下的氨基酸浓度为最优浓度,浓度范围是0.01wt%~1wt%,具体的数值为0.01 wt%,0.03 wt%,0.1 wt%, 0.3 wt%,1.0 wt%;不同降温速率是通过水浴控温程序设定降温速率,进而控制初始氢气水合物生成速率,0.02K/min,0.05 K/min,0.1 K/min,0.3 K/min;

[0056] 采用本发明实施例的提高氢气水合物重量储氢量方法及装置制备的水合物法重量储氢量的值可以从0.15 wt%提高到0.27 wt%。

[0057] 本发明实施例提出将热力学促进剂和氨基酸类动力学促进剂相结合以及缓慢降温实验步骤来加快氢气水合物生成速率,提高氢气水合物转化率,进而增加储氢密度的方法。最重要的创意是优化氨基酸浓度,并在优化后的氨基酸浓度下,采用缓慢降温生成水合物法来提高氢气水合物转化率,增加重量储氢量。

[0058] 如图2所示,为本方法所涉及的水合物生成实验系统图。本发明提供的水合物生成实验设备是半可视带搅拌的装置。实验系统主要包括以下系统:注气系统、水合物生成系统、搅拌系统、控温系统以及数据采集系统。

[0059] 用于注入氢气和/或氧气的注气系统,包括高压气瓶9,高压气瓶9以及柱塞泵8均连接在活塞容器7,活塞容器7上设有压力表10;

[0060] 用于生成含氢混合水合物的水合物生成系统,包括通过活塞容器7和柱塞泵8连接的水合物反应容器1,水合物反应容器1为半可视带搅拌反应釜,在顶部以及左右侧开有视窗2;在视窗2的右侧放置 CCD(电荷耦合器件)摄像机14;

[0061] 用于促进水合物成核的搅拌系统,包括设置在水合物反应容器1底部的磁力转子4和磁力搅拌器5构成;

[0062] 用于控制升降温速率的控温系统,包括放置有所述水合物反应容器1的水浴槽3,水浴槽3连接程序控温循环水浴6;

[0063] 以及用于收集温度和压力数据的数据采集系统13,包括采集得到水合物反应容器1内部温度和压力的热电偶11和压力传感器12,其热电偶11如图2的“T”椭圆所示,压力传感器12如图2的“P”椭圆所示。

[0064] 所述水合物反应容器1如图3a和图3b所示。

## 实施例

[0065] 本实施例中的提高氢气水合物重量储氢量的装置的使用步骤如下:

[0066] 高压气瓶9连接在活塞容器7上,活塞容器上安装有压力表(10),除此之外,柱塞泵8也连接在活塞容器7上,气体通过活塞容器7和柱塞泵8注入到水合物反应容器1内,水合物反应容器是半可视带搅拌反应釜,水合物反应容器顶部以及左右两侧开有视窗2,在视窗2的右侧设置有CCD摄像机14,目的是更好地观察到水合物晶体形貌的演变,磁力转子4放置在水合物反应容器底部,水合物反应容器1放置在水浴槽3中,起到保温的效果,水浴槽3连接程序控温循环水浴6,控制水合物反应容器的温度,并维持温度稳定的作用,水浴槽放在搅拌容器上;反应釜内部的温度和压力分别通过热电偶11和压力传感器12采集得到,之后反映到数据采集系统14上,其热电偶11如图2的“T”椭圆所示,压力传感器12如图2的“P”椭圆所示。

[0067] 在此装置的基础上,本实施例提出一种提高氢气水合物重量储氢量的方法,步骤如下:

[0068] 在 $H_2$ (氢气)水合物中,加入热力学促进剂降低氢气水合物生成压力,热力学促进剂浓度可以选择化学计量浓度为0.1 mol%~6 mol%,优选为5.56 mol%,除此之外,在热力学促进剂的基础上还添加氨基酸类动力学促进剂,氢气水合物在该两种促进剂的协同作用下,气体消耗量值进一步增加,接着优化动力学促进剂来加快氢气水合物生成速率,提高重量储氢量。热力学促进剂选择四氢呋喃(THF)、1,3-二氧戊烷(DIOX)、环戊烷(CP),动力学促进剂有氨基酸(缬氨酸、蛋氨酸、亮氨酸等),在最优动力学促进剂下,还通过改变降温速率来控制水合物初始生成速率,进而增加氢气水合物转化率,提高重量储氢量。

[0069] 其中降温速率的取值范围为0.01K/min~0.5 K/min,具体数值为0.3K/min,0.1K/min,0.05K/min,0.02K/min。

[0070] 本实施例通过生成氢气水合物的方式来提高储氢量,生产的氢气水合物的分解产物只有水分子和氢气,不包含其他污染环境的物质,该实验技术环保,且对环境无害,并且水合物制备的过程中所用的反应釜开有三个可视窗口带搅拌,可以实现重量储氢量的提高和解释氢气水合物生成机理等。

[0071] 本实施例中的热力学促进剂可以选择液体和气体,气体热力学促进剂有丙烷( $C_3H_8$ )、二氧化碳( $CO_2$ ),液体热力学促进剂有环戊烷(CP)、1,3-二氧戊环(1,3 dioxolane)以及有机盐类:四丁基溴化铵(TBAB)、四丁基硝酸铵(TBANO<sub>3</sub>)等,动力学促进剂不仅限于氨基酸,还可以选择多孔介质,比如活性炭、碳纳米材料、石墨烯等。探究不同热力学促进剂与多孔介质耦合对氢气水合物生成动力学的影响。

[0072] 本实施例提出的提高氢气水合物重量储氢量的方法还可以用于研究不同热力学促进剂和动力学促进剂的协同作用对氢气水合物生成动力学的影响,并优化不同种类的动力学促进剂,进而得到对水合物生成动力学促进作用达到最大值的动力学促进剂比例。

[0073] 本实施例通过程序控温循环水浴改变降温速率进而控制水合物初始生成速率的方法,并在搅拌的作用下,促使水合物颗粒分散在气液两相中,而不是形成水合物层堆积在气液界面处,阻碍了氢气与水的进一步接触。

[0074] 实验例:

[0075] 如图1和图2所示,将水合物反应容器1洗净并烘干,然后注入30ml热力学促进剂和动力学促进剂的混合溶液(THF和缬氨酸混合溶液),盖上水合物反应容器1的盖子,将其置于水浴槽3中;

[0076] 接着调节水浴槽3初始温度为9.6°C,打开连接高压气瓶9的阀门,通过注气系统注入H<sub>2</sub>至1MPa吹扫反应容器3次;

[0077] 缓慢注H<sub>2</sub>至12.0MPa,当温度稳定在9.6 °C时,打开磁力搅拌器5,转速设置为600 r/min;

[0078] 接着将水浴温度从9.6°C降温至1 °C,降温速率为0.05 K/min,降至1°C后,维持温度不变;在降温过程中水合物不断生成;

[0079] 待水合物反应容器1压降小于0.01MPa/h时,表明水合物生成基本结束,这时,升高水浴温度至9.6°C,升温速率为0.15 K/min,通过热刺激分解水合物。

[0080] 通过压力和温度数据可以分析出H<sub>2</sub>的消耗量以及重量储氢量。

[0081] 如图4所示,本实验例中THF的化学计量浓度为固定值5.56 mol%,氢气消耗量值最大为31.74 v/v。

[0082] 未加入缬氨酸时,氢气消耗值为13.93 v/v,随着缬氨酸浓度从0.01 wt%增加到0.3 wt%,气体消耗量值从20.94 v/v增加到31.74 v/v;

[0083] 当缬氨酸质量分数增加到1.0 wt%,氢气消耗量值降低到21.75 v/v。

[0084] 通过对比有无动力学促进剂缬氨酸的水合物诱导时间和氢气消耗量可以发现,加入缬氨酸可以降低水合物诱导时间,并且随着缬氨酸浓度的增加,水合物诱导时间可以呈现出不断被缩短的趋势。

[0085] 如图5所示,其中缬氨酸浓度的具体数据分别为0.01 wt%,0.03 wt%,0.1 wt%,0.3 wt%,所对应的重量储氢量的具体数据分别为:0.18 wt%,0.23 wt%,0.26 wt%,0.27 wt%,0.17 wt%。

[0086] 除此之外,通过分析重量储氢量,也可以发现缬氨酸和THF的协同作用,进一步增加了储氢密度,随着缬氨酸浓度增加到0.3 wt%时,储氢密度达到最大。

[0087] 比较例:

[0088] 如图6所示,与其他H<sub>2</sub>-THF水合物体系(几种THF实验浓度和不同实验温度)相比,不难发现,当THF浓度为5.56 mol%,温度为266.7 K时可以获得较高的重量储氢量0.28 wt%,同时发现在5.56 mol% THF和0.3 wt% 缬氨酸复配下,可以实现在较高温度(274.2 K)下得到更高的重量储氢量0.27 wt%。

[0089] 本发明实施例具有如下有益效果:

[0090] 1、纯氢气水合物生成条件苛刻,当压力超过100MPa,温度低于249 K时,氢气水合物才可能稳定存在,本发明实施例在氢气水合物中加入化学计量浓度的热力学促进剂,可以降低纯氢气水合物相平衡压力,进而达到温和的实验条件,使含氢水合物有着适度的形成和储存条件,并且水合物法储氢可以实现长期非爆炸性储存。

[0091] 2、氨基酸是一种环保型动力学促进剂,可以提高水合物生成动力学,本方法在热力学促进剂(THF或DIOX)和氨基酸的协同作用下可以进一步加快氢气水合物的生成速率,并且提高氢气水合物转化率。

[0092] 3、水合物反应容器为半可视化加搅拌的反应釜装置,通过搅拌可以增大气液接触面积,进而加快 $H_2$ -THF水合物成核速率,并且通过顶部和侧面的视窗,可以更深层的观察水合物晶体形貌的变化,进而为了解动力学促进剂促进氢气水合物生长的机理奠定一定的基础。

[0093] 4、通过实验优化得到的氨基酸浓度对氢气水合物有着更明显的动力学促进作用,水合物诱导时间进一步缩短,氢气消耗量最高,重量储氢量达到最大值。

[0094] 5、本发明实施例通过控制初始氢气水合物形成速率可以使水合物颗粒在搅拌作用下扩散到水溶液中,而不是以层状形式聚集到气液界面处,可能加快界面处的传热传质,增加氢气消耗量,进而提高重量储氢量。

[0095] 在一些实施例中,还可以改变不同热力学促进剂浓度,选用低浓度的热力学促进剂,可能实现氢气占据大笼,进而提高重量储氢量。

[0096] 在一些实施例中,可以选用其他环保型动力学促进剂(纤维素,淀粉等)来与热力学促进剂相结合促进氢气水合物生成动力学。

[0097] 在一些实施例中,可以选用多孔介质(碳材料等)来改善氢气分子与液相的扩散通道,进而提高氢气水合物转化率。

[0098] 本发明实施例还可以应用于天然气储运、水合物法海水淡化技术、二氧化碳捕集封存和气体分离等。

[0099] 以上内容是结合具体的优选实施方式对本发明所作的进一步详细说明,不能认定本发明的具体实施只局限于这些说明。对于本发明所属技术领域的技术人员来说,在不脱离本发明构思的前提下,还可以做出若干等同替代或明显变型,而且性能或用途相同,都应当视为属于本发明的保护范围。

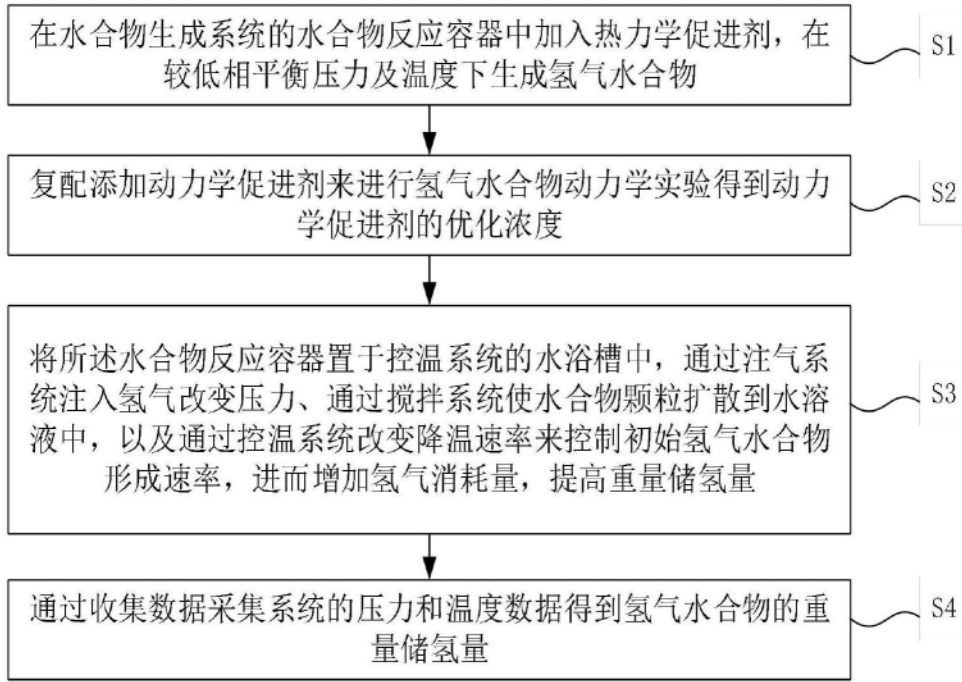


图1

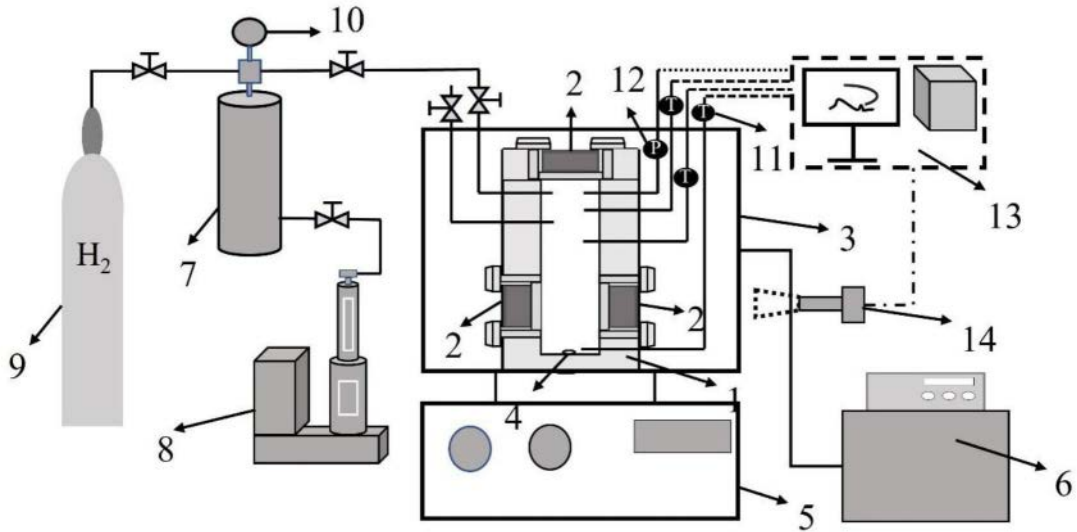


图2

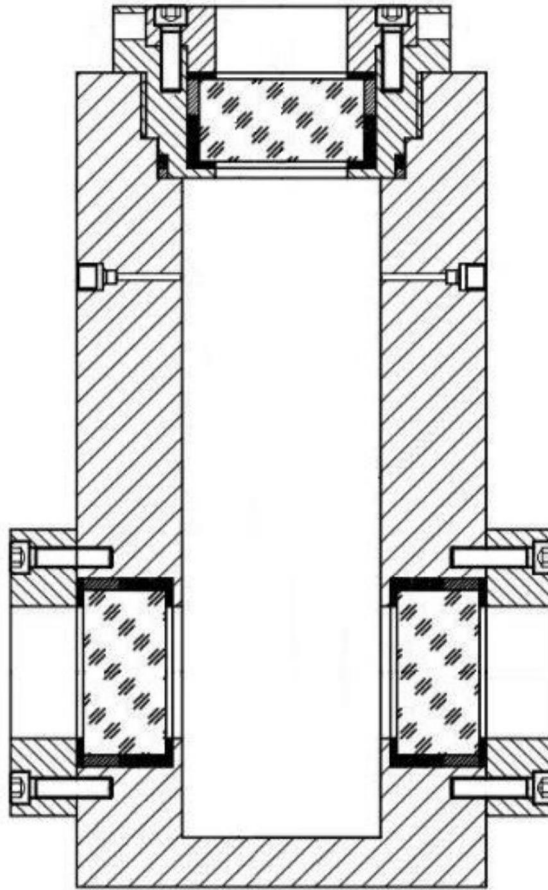


图3a

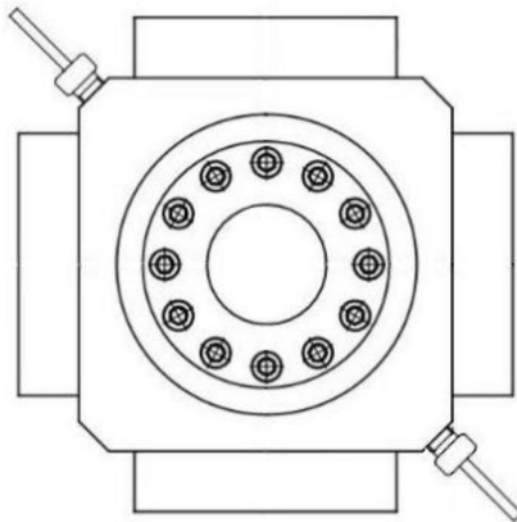


图3b

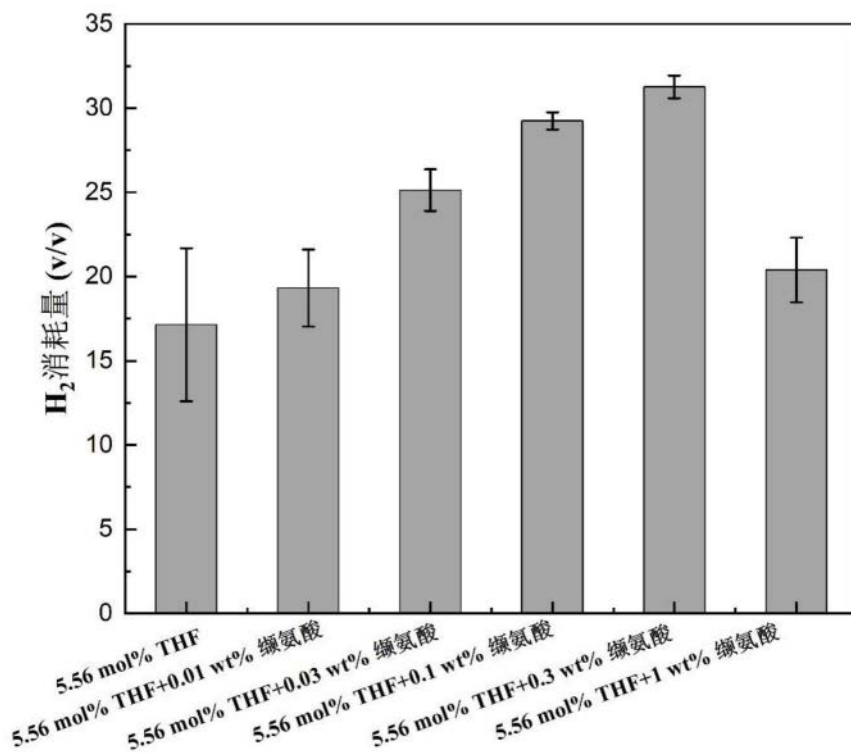


图4

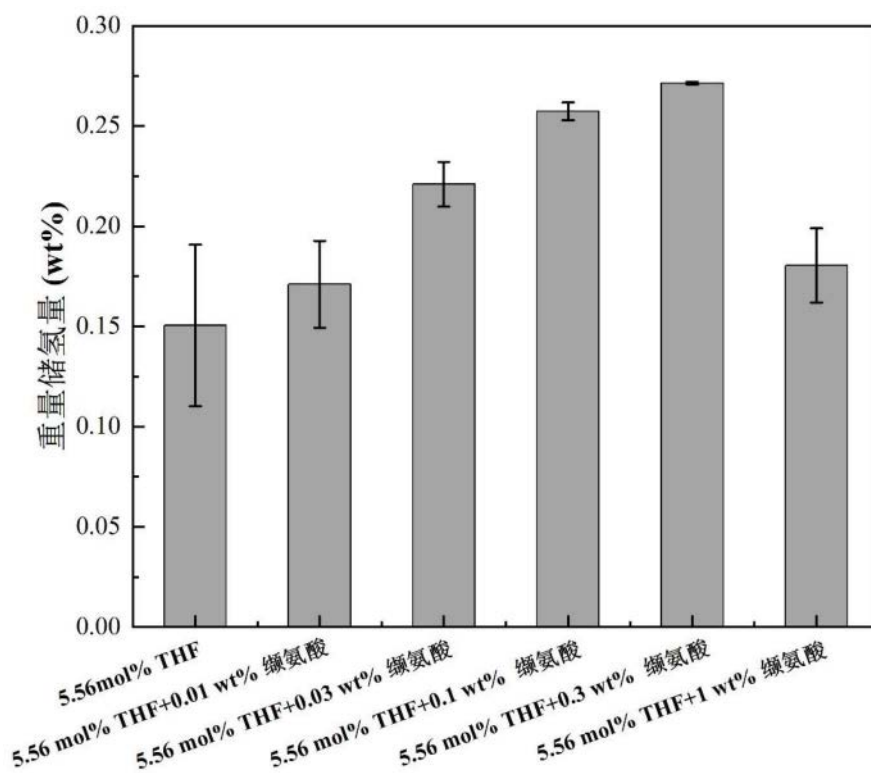


图5

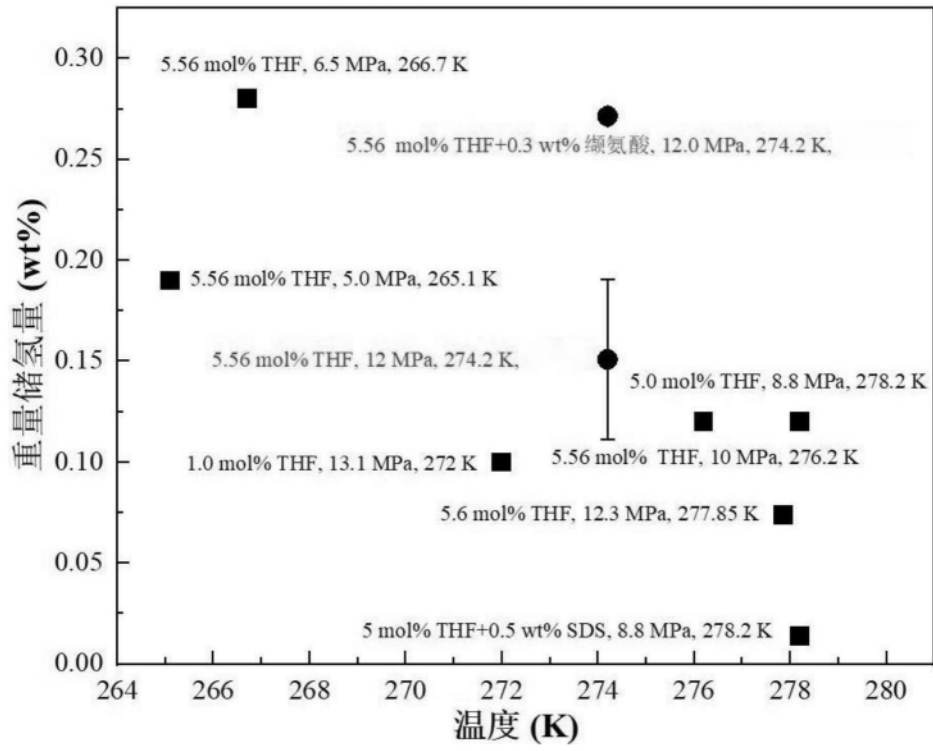


图6