

(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102590374 B

(45) 授权公告日 2013. 07. 03

(21) 申请号 201210020328. 0

(22) 申请日 2012. 01. 29

(73) 专利权人 扬州大学

地址 225009 江苏省扬州市大学南路 88 号

(72) 发明人 程宏辉 王昌龙 秦康生 黄新

陈飞 张敬尧

(74) 专利代理机构 扬州苏中专利事务所(普通合伙) 32222

代理人 许必元

(51) Int. Cl.

G01N 30/02(2006. 01)

审查员 黎作佳

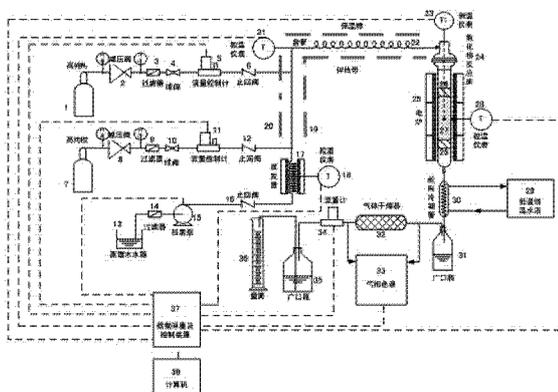
权利要求书2页 说明书6页 附图1页

(54) 发明名称

一种复杂金属氢化物蒸汽水解制氢测试系统

(57) 摘要

本发明公开了一种复杂金属氢化物蒸汽水解制氢测试系统,该测试系统包含气路系统和测控系统,以评估不同复杂金属氢化物材料在含有不同促进剂和催化剂的水蒸气中水解的放氢速率和产率,从而筛选出能够满足燃料电池汽车发展要求的低成本储氢材料和蒸汽水解剂的配方。测试系统包含高压气瓶、减压阀、过滤器、球阀、流量控制计、止回阀、水箱、柱塞泵、蒸发器、盘管、伴热带、氢化物反应床、电炉、低温水浴、气相色谱、气体干燥器、控温仪表、测温仪表、计算机、数据采集及控制装置和控制软件等。整个数据处理过程由控制软件依据相关计算方法完成。本发明具有人机操作界面良好,操作方便简单,检验效率高,成本低,测试数据准确度和重复性高等优点。



1. 一种复杂金属氢化物蒸汽水解制氢测试系统,该测试系统包含气路系统和测控系统,气路系统实现对气体的流动控制,测控系统实现对温度和流量数据的采集和控制,其特征是所述测控系统设有测温仪表、控温仪表、流量计、主气管、流量控制计、气相色谱仪、柱塞泵、数据采集及控制装置、计算机以及装在计算机上的控制软件;所述气路系统设有高纯 $N_2$ 瓶、高纯 $H_2$ 瓶、减压阀、过滤器、球阀、流量控制计、止回阀、蒸馏水水箱、柱塞泵、蒸发器、盘管、伴热带、保温棉、氢化物反应床、电炉、玻璃棉塞、蛇形冷凝管、低温水浴、广口瓶、气体干燥器、气相色谱仪、流量计、量筒、不锈钢管;

所述高纯 $N_2$ 瓶(1)通过不锈钢管与出入口带有压力显示表的第一减压阀(2)相连,第一减压阀(2)通过不锈钢管与第一过滤器(3)相连,第一过滤器(3)通过不锈钢管与第一球阀(4)相连,第一球阀(4)通过不锈钢管与第一流量控制计(5)相连,第一流量控制计通过不锈钢管与第一止回阀(6)相连,第一止回阀通过不锈钢管和三通接头与主气管相连;

所述高纯 $H_2$ 瓶(7)通过不锈钢管与出入口带有压力显示表的第二减压阀(8)相连,第二减压阀(8)通过不锈钢管与第二过滤器(9)相连,第二过滤器(9)通过不锈钢管与第二球阀(10)相连,第二球阀(10)通过不锈钢管与第二流量控制计(11)相连,第二流量控制计(11)通过不锈钢管与第二止回阀(12)相连,第二止回阀通过不锈钢管和三通接头与主气管相连;

所述蒸馏水水箱(13)中承有蒸馏水或者含有挥发性促进剂或者催化剂的水溶液,蒸馏水水箱(13)通过不锈钢管与第三过滤器(14)相连,第三过滤器(14)通过不锈钢管与柱塞泵(15)相连,柱塞泵(15)通过不锈钢管与第三止回阀(16)相连,第三止回阀(16)通过不锈钢管与蒸发器(17)相连,蒸发器(17)上安装有第一控温仪表(18),实现蒸发器温度的控制,蒸发器(17)通过不锈钢管和三通接头与主气管相连;

主气管上缠有伴热带(19),伴热带(19)的外面缠有保温棉(20),第二控温仪表(21)控制伴热带(19)的加热温度,主气管与不锈钢盘管(22)相连,不锈钢盘管(22)通过不锈钢管与氢化物反应床(24)相连,氢化物反应床(24)内中心位置填装了被测的氢化物材料和玻璃珠的混合物(27),氢化物材料和玻璃珠的混合物(27)的两边装有石英棉塞(26),氢化物反应床(24)放置在电炉(25)中,同时确保氢化物材料和玻璃珠的混合物(27)处在电炉(25)的聚温区,测温仪表(23)的热电偶测温点放在氢化物材料和玻璃珠混合物(27)的中心位置,以测量反应物中心位置的温度,电炉(25)上装有第三控温仪表(28)以实现温度的控制,氢化物反应床(24)通过不锈钢管与蛇形冷凝管(30)气体输入端口相连,蛇形冷凝管(30)液体输入端口和输出端口与低温水浴(29)相连,蛇形冷凝管(30)的气体输出端口通过不锈钢管与第一广口瓶(31)相连,第一广口瓶(31)通过不锈钢管和三通接头与气体干燥器(32)相连,蛇形冷凝管(30)气体输出端口出来的是气体和液体,其中液体流入广口瓶(31)中,气体流入气体干燥器(32)中,气体干燥器(32)的上下游有两个取样端口,这两个取样端口通过不锈钢管与气相色谱仪(33)相连,气体干燥器(32)通过不锈钢管以及三通接头与流量计(34)相连,流量计(34)通过不锈钢管与第二广口瓶(35)相连,第二广口瓶(35)通过PP软管与量筒(36)相连,PP软管的入口插入到第二广口瓶(35)的瓶底,PP软管的出口放在量筒(36)的上方;

测控系统的第一流量控制计(5)、第二流量控制计(11)、柱塞泵(15)、第一控温仪表(18)、第二控温仪表(21)、第三控温仪表(28)、测温仪表(23)、气相色谱仪(33)分别通过信

号电缆与数据采集及控制装置(37)相连,数据采集及控制装置(37)通过信号电缆与安装了测试系统的控制软件的计算机(38)相连,计算机通过控制软件实现对测试系统的计算机控制和测试结果曲线的自动绘制。

2. 根据权利要求1所述的一种复杂金属氢化物蒸汽水解制氢测试系统,其特征是所述控制软件是通过VB、VC或者LabVIEW编程获得,控制软件中实时产氢率的计算方法为 
$$\text{实时产氢率} = \frac{\text{氢气流量实时累积值}}{\text{理论最大产氢量}}$$
,其中蒸汽水解所产生的实时氢气流量为流量计显示流量减去与高压H<sub>2</sub>瓶连接的流量控制计显示流量,氢气流量的实时累积值为实时氢气流量曲线的累积积分。

3. 根据权利要求1所述的一种复杂金属氢化物蒸汽水解制氢测试系统,其特征是所述过滤器(3)、(9)、(14)所过滤的颗粒粒径范围为0.5 μm~40 μm。

4. 根据权利要求1所述的一种复杂金属氢化物蒸汽水解制氢测试系统,其特征是所述高纯N<sub>2</sub>瓶(1)中的气体纯度范围为99.99vol%~99.99999vol%。

5. 根据权利要求1所述的一种复杂金属氢化物蒸汽水解制氢测试系统,其特征是所述高纯H<sub>2</sub>瓶(7)中的气体纯度为99.99vol%~99.99999vol%。

6. 根据权利要求1所述的一种复杂金属氢化物蒸汽水解制氢测试系统,其特征是所述柱塞泵(15)的液体流量调节范围为0~1ml/min。

7. 根据权利要求1所述的一种复杂金属氢化物蒸汽水解制氢测试系统,其特征是所述第一流量控制计(5)和第二流量控制计(11)的流量控制范围为0~500ml/min。

8. 根据权利要求1所述的一种复杂金属氢化物蒸汽水解制氢测试系统,其特征是所述蒸发器(17)温度调节范围为100~500℃。

9. 根据权利要求1所述的一种复杂金属氢化物蒸汽水解制氢测试系统,其特征是所述伴热带(19)温度调节范围为100~130℃。

10. 根据权利要求1所述的一种复杂金属氢化物蒸汽水解制氢测试系统,其特征是所述氢化物反应床(24)为石英管或者304不锈钢管或者316不锈钢管或者316L不锈钢管。

## 一种复杂金属氢化物蒸汽水解制氢测试系统

### 技术领域

[0001] [0001] 本发明涉及氢化物材料制氢性能的评定领域,特别是一种用于复杂金属氢化物蒸汽水解制氢的测试系统。

### 背景技术

[0002] [0002] 随着化石能源的逐步枯竭和全球环境的恶化,人们越来越关注绿色新能源技术。氢能具有许多优点,包括燃烧热值高,燃烧产物为水,干净清洁,资源丰富,可以由水制取,实现自然物质的循环利用。目前,各国竞相研究以氢为能源的燃料电池汽车技术,但是该技术瓶颈之一在于如何获得满足汽车运行要求的储氢系统。为此美国能源部(DOE)制定了非常严格的燃料电池汽车储氢系统的 FreedomCAR 计划,其中包含的两项重要的技术指标是重量储氢量,或者称为比能(specific energy),以及体积储氢量,或者称为能量密度(energy density)。FreedomCAR 计划要求到 2015 年储氢系统的比能要达到  $0.09\text{kgH}_2/\text{kg}$  储氢系统,能量密度达到  $0.081\text{H}_2/\text{L}$  储氢系统。这些要求是基于系统的质量和容积的,即不仅包含储氢材料本身,而且还包含反应器,高压容器,阀门以及所有的附属设备。因此,这两项指标对储氢系统所使用的储氢材料的性能提出了很高的要求。

[0003] [0003] 目前,只有潜在的几类储氢材料能够满足要求,其中包括复杂金属氢化物,如  $\text{NaBH}_4$ 、 $\text{LiBH}_4$  等。这些材料需要通过水解反应放出氢气。以  $\text{NaBH}_4$  为例,通过水溶液水解析氢反应式为:  $\text{NaBH}_4 + (2+x)\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}_2 + \text{NaBO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O} + \Delta\text{H}$ 。该反应是放热反应,水溶液中经常通过加入催化剂或者促进剂来提高放氢动力学和氢气产率。在理想情况下,2mol 的水可以产生 4mol 的氢气,但是实际过程中,水溶液水解反应需要大量的过剩水,这无疑对满足 FreedomCAR 计划的比能和能量密度要求是非常不利的。根据 FreedomCAR 计划的两项指标进行计算可以得出过剩水 x 的数值最多不能超过 0.84,而  $\text{NaBH}_4$  水溶液的浓度极限为 35wt%,对应的过剩水 x 的数值是 1.9。因此,可以确定通过水溶液水解的方式在理论上已无法满足 FreedomCAR 计划 2015 年的指标要求的。为此需要改变制氢的方式,而复杂金属氢化物蒸汽水解制氢在理论上是能够满足这样的要求。

[0004] [0004] 为此,需要建立一套复杂金属氢化物蒸汽水解制氢测试系统和相关检测方法以评估不同复杂金属氢化物材料在含有不同促进剂和催化剂的水蒸气中水解的放氢速率和产率,从而筛选出能够满足要求的低成本的储氢材料和蒸汽水解剂的配方。

### 发明内容

[0005] [0005] 本发明的目的就是为检测不同复杂金属氢化物材料在含有不同促进剂和催化剂的水蒸气中水解的放氢速率和产氢率,提供一种复杂金属氢化物蒸汽水解制氢测试系统。

[0006] [0006] 本发明的目的是通过以下技术方案来实现的:

[0007] 一种复杂金属氢化物蒸汽水解制氢测试系统,该测试系统包含气路系统和测控系统,气路系统实现对气体的流动控制,测控系统实现对温度和流量数据的采集和控制,其特

征是所述测控系统设有测温仪表、控温仪表、流量计、主气管、流量控制计、气相色谱仪、柱塞泵、数据采集及控制装置、计算机以及装在计算机上的控制软件；所述气路系统设有高纯 N<sub>2</sub> 瓶、高纯 H<sub>2</sub> 瓶、减压阀、过滤器、球阀、流量控制计、止回阀、蒸馏水水箱、柱塞泵、蒸发器、盘管、伴热带、保温棉、氢化物反应床、电炉、玻璃棉塞、蛇形冷凝管、低温水浴、广口瓶、气体干燥器、气相色谱仪、流量计、量筒、不锈钢管；

[0008] 所述高纯 N<sub>2</sub> 瓶通过不锈钢管与出入口带有压力显示表的第一减压阀相连，第一减压阀通过不锈钢管与第一过滤器相连，第一过滤器通过不锈钢管与第一球阀相连，第一球阀通过不锈钢管与第一流量控制计相连，第一流量控制计通过不锈钢管与第一止回阀相连，第一止回阀通过不锈钢管和三通接头与主气管相连；

[0009] 所述高纯 H<sub>2</sub> 瓶通过不锈钢管与出入口带有压力显示表的第二减压阀相连，第二减压阀通过不锈钢管与第二过滤器相连，第二过滤器通过不锈钢管与第二球阀相连，第二球阀通过不锈钢管与第二流量控制计相连，第二流量控制计通过不锈钢管与第二止回阀相连，第二止回阀通过不锈钢管和三通接头与主气管相连；

[0010] 所述蒸馏水水箱中承有蒸馏水或者含有挥发性促进剂或者催化剂的水溶液，蒸馏水水箱通过不锈钢管与第三过滤器相连，第三过滤器通过不锈钢管与柱塞泵相连，柱塞泵通过不锈钢管与第三止回阀相连，第三止回阀通过不锈钢管与蒸发器相连，蒸发器上安装有第一控温仪表，实现蒸发器温度的控制，蒸发器通过不锈钢管和三通接头与主气管相连；

[0011] 主气管上缠有伴热带，伴热带的外面缠有保温棉，第二控温仪表控制伴热带的加热温度，主气管与不锈钢盘管相连，不锈钢盘管通过不锈钢管与氢化物反应床相连，氢化物反应床内中心位置填装了被测的氢化物材料和玻璃珠的混合物，氢化物材料和玻璃珠的混合物的两边装有石英棉塞，氢化物反应床放置在电炉中，同时确保氢化物材料和玻璃珠的混合物处在电炉的聚温区，测温仪表的热电偶测温点放在氢化物材料和玻璃珠混合物的中心位置，以测量反应物中心位置的温度，电炉上装有第三控温仪表以实现温度的控制，氢化物反应床通过不锈钢管与蛇形冷凝管气体输入端口相连，蛇形冷凝管液体输入端口和输出端口与低温水浴相连，蛇形冷凝管的气体输出端口通过不锈钢管与第一广口瓶相连，第一广口瓶通过不锈钢管和三通接头与气体干燥器相连，蛇形冷凝管气体输出端口出来的是气体和液体，其中液体流入广口瓶中，气体流入气体干燥器中，气体干燥器的上下游有两个取样端口，这两个取样端口通过不锈钢管与气相色谱仪相连，气体干燥器通过不锈钢管以及三通接头与流量计相连，流量计通过不锈钢管与第二广口瓶相连，第二广口瓶通过 PP 软管与量筒相连，PP 软管的入口插入到第二广口瓶的瓶底，PP 软管的出口放在量筒的上方；

[0012] 测控系统的第一流量控制计、第二流量控制计、柱塞泵、第一控温仪表、第二控温仪表、第三控温仪表、测温仪表、气相色谱仪分别通过信号电缆与数据采集及控制装置相连，数据采集及控制装置通过信号电缆与安装了测试系统的控制软件的计算机相连，计算机通过控制软件实现对测试系统的计算机控制和测试结果曲线的自动绘制。

[0013] [0007] 所述控制软件是通过 VB、VC 或者 LabVIEW 编程获得，控制软件中实时产氢率的计算方法为 
$$\text{实时产氢率} = \frac{\text{氢气流量实时累积值}}{\text{理论最大产氢量}}$$
，其中蒸汽水解所产生的实时氢气流量为流量计显示流量减去与高压 H<sub>2</sub> 瓶连接的流量控制计显示流量，氢气流量的实时累积值为

实时氢气流量曲线的累积积分。

- [0014] [0008] 所述过滤器所过滤的颗粒粒径范围为  $0.5\ \mu\text{m}\sim 40\ \mu\text{m}$ 。
- [0015] [0009] 所述高纯  $\text{N}_2$  瓶中的气体纯度范围为  $99.99\text{vol}\%\sim 99.99999\text{vol}\%$ 。
- [0016] [0010] 所述高纯  $\text{H}_2$  瓶中的气体纯度为  $99.99\text{vol}\%\sim 99.99999\text{vol}\%$ 。
- [0017] [0011] 所述柱塞泵的液体流量调节范围为  $0\sim 1\text{ml}/\text{min}$ 。
- [0018] [0012] 所述第一流量控制计和第二流量控制计的流量控制范围为  $0\sim 500\text{ml}/\text{min}$ 。
- [0019] [0013] 所述蒸发器温度调节范围为  $100\sim 500^\circ\text{C}$ 。
- [0020] [0014] 所述伴热带温度调节范围为  $100\sim 130^\circ\text{C}$ 。
- [0021] [0015] 所述氢化物反应床为石英管或者 304 不锈钢管或者 316 不锈钢管或者 316L 不锈钢管。
- [0022] [0016] 氢化物反应床的氢化物材料和玻璃珠混合物中, 氢化物的质量范围  $0\sim 10\text{g}$ , 玻璃珠的直径范围为  $2\sim 6\text{mm}$ 。
- [0023] [0017] 所述电炉的温度控制范围为  $100\sim 500^\circ\text{C}$ 。电炉取决于氢化物反应床的大小, 有可能是三段炉, 以获得更长的聚温区。
- [0024] [0018] 所述低温水浴输出的冷却水温度为  $0\sim 20^\circ\text{C}$ 。
- [0025] [0019] 所述气体干燥器中填充的吸水物质为硅胶, 无水硫酸铜、无水  $\text{CaCl}_2$  或者  $\text{CaO}$  等。
- [0026] [0020] 所述的气体减压阀输出的压力调节范围为  $0.1\sim 4\text{MPa}$ 。
- [0027] [0021] 所述数据采集及控制装置可能是数据采集卡也有可能是 PLC 及 PLC 模块。
- [0028] [0022] 本发明的优点和积极效果为:
- [0029] (1) 可为复杂金属氢化物材料进行蒸汽水解制氢性能的测试;
- [0030] (2) 同时也适用于所有种类的氢化物蒸汽水解制氢性能的测试;
- [0031] (3) 人机操作界面良好;
- [0032] (4) 所检测获得的数据准确度和重复性较高;
- [0033] (5) 检验效率高, 成本低;
- [0034] (6) 结构紧凑可靠, 操作方便简单。

#### 附图说明

- [0035] [0023] 图 1 为本发明的结构示意图。
- [0036] [0024] 图 2 为通过本发明测试获得的  $\text{NaBH}_4$  蒸汽水解放氢动力学曲线。
- [0037] [0025] 图中: 1 高纯  $\text{N}_2$  瓶、2 第一减压阀、3 第一过滤器、4 第一球阀、5 第一流量控制计、6 第一止回阀、7 高纯  $\text{H}_2$  瓶、8 第二减压阀、9 第二过滤器、10 第二球阀、11 第二流量控制计、12 第二止回阀、13 蒸馏水水箱、14 第三过滤器、15 柱塞泵、16 第三止回阀、17 蒸发器、18 第一控温仪表、19 伴热带、20 保温棉、21 第二控温仪表、22 不锈钢盘管、23 测温仪表、24 氢化物反应床、25 电炉、26 石英棉塞、27 混合物、28 第三控温仪表、29 低温水浴、30 蛇形冷凝管、31 第一广口瓶、32 气体干燥器、33 气相色谱仪、34 流量计、35 第二广口瓶、36 量筒、37 数据采集及控制装置、38 计算机。

#### 具体实施方式

[0038] [0026] 下面结合附图 1 对本发明作进一步详述：

[0039] 一种复杂金属氢化物蒸汽水解制氢测试系统，包含气路系统和测控系统。气路系统实现对气体的流动控制，测控系统实现对温度和流量数据的采集和控制。测控系统主要由测温仪表、控温仪表、流量计、主气管、流量控制计、气相色谱仪、柱塞泵、数据采集及控制装置、计算机以及装在计算机上的控制软件构成。而气路系统主要由高纯 N<sub>2</sub> 瓶、高纯 H<sub>2</sub> 瓶、减压阀、过滤器、球阀、流量控制计、止回阀、蒸馏水水箱、柱塞泵、蒸发器、盘管、伴热带、保温棉、氢化物反应床、电炉、玻璃棉塞、蛇形冷凝管、低温水浴、广口瓶、气体干燥器、气相色谱仪、流量计、量筒，氢化物样品、不锈钢管构成。

[0040] [0027] 气路系统具体的连接方式为：高纯 N<sub>2</sub> 瓶 1，通过不锈钢管与出入口带有压力显示表的第一减压阀 2 相连，然后通过不锈钢管与第一过滤器 3 相连，然后通过不锈钢管与第一球阀 4 相连，然后通过不锈钢管与第一流量控制计 5 相连，第一流量控制计通过不锈钢管与第一止回阀 6 相连，第一止回阀通过不锈钢管和三通接头与主气管相连。高纯 H<sub>2</sub> 瓶 7 通过不锈钢管与出入口带有压力显示表的第二减压阀 8 相连，然后通过不锈钢管与第二过滤器 9 相连，然后通过不锈钢管与第二球阀 10 相连，然后通过不锈钢管与第二流量控制计 11 相连，然后通过不锈钢管与第二止回阀 12 相连，第二止回阀通过不锈钢管和三通接头与主气管相连。蒸馏水水箱 13 中承有蒸馏水或者含有挥发性促进剂或者催化剂的水溶液，并且通过不锈钢管与第三过滤器 14 相连，第三过滤器 14 通过不锈钢管与柱塞泵 15 相连，柱塞泵 15 通过不锈钢管与第三止回阀 16 相连，第三止回阀 16 通过不锈钢管与蒸发器 17 相连。蒸发器 17 上安装有第一控温仪表 18，实现蒸发器温度的控制。蒸发器 17 通过不锈钢管和三通接头与主气管相连，主气管上缠有伴热带 19，伴热带 19 的外面缠有保温棉 20，第二控温仪表 21 控制伴热带 19 的加热温度。主气管与不锈钢盘管 22 相连，不锈钢盘管 22 通过不锈钢管与氢化物反应床 24 相连。氢化物反应床 24 内中心位置填装了被测的氢化物材料和玻璃珠的混合物 27。氢化物材料和玻璃珠的混合物 27 的两边装有石英棉塞 26，氢化物反应床 24 放置在电炉 25 中，同时确保氢化物材料和玻璃珠的混合物 27 处在电炉 25 的聚温区。测温仪表 23 的热电偶测温点放在氢化物材料和玻璃珠混合物 27 的中心位置，以测量反应物中心位置的温度。电炉 25 上装有第三控温仪表 28 以实现对温度的控制。氢化物反应床 24 通过不锈钢管与蛇形冷凝管 30 气体输入端口相连，蛇形冷凝管 30 液体输入端口和输出端口与低温水浴 29 相连。蛇形冷凝管 30 的气体输出端口通过不锈钢管与第一广口瓶 31 相连，第一广口瓶 31 通过不锈钢管和三通接头与气体干燥器 32 相连。蛇形冷凝管 30 气体输出端口出来的是气体和液体，其中液体流入广口瓶 31 中，气体流入气体干燥器 32 中。气体干燥器 32 的上下游有两个取样端口，这两个取样端口通过不锈钢管与气相色谱仪 33 相连。气体干燥器 32 通过不锈钢管以及三通接头与流量计 34 相连。流量计 34 通过不锈钢管与第二广口瓶 35 相连，第二广口瓶 35 通过 PP 软管与量筒相连。PP 软管的入口应插入到第二广口瓶 35 的瓶底，PP 软管的出口放在量筒 36 的上方。

[0041] [0028] 测控系统的连接方式为第一流量计控制计 5、第二流量控制计 11、柱塞泵 15、第一控温仪表 18、第二控温仪表 21、第三控温仪表 28、测温仪表 23、气相色谱仪 33 通过信号电缆与数据采集及控制装置 37 相连。数据采集及控制装置 37 通过信号电缆与计算机 38 相连。计算机上安装了测试系统的控制软件。通过控制软件实现对测试系统的计算机控制和测试结果曲线的自动绘制。

- [0042] [0029] 所述过滤器 3、9、14 所过滤的颗粒粒径为  $0.5\ \mu\text{m}\sim 40\ \mu\text{m}$ 。
- [0043] [0030] 所述高纯  $\text{N}_2$  瓶 1 中的气体纯度为  $99.99\text{vol}\%\sim 99.99999\text{vol}\%$ 。
- [0044] [0031] 所述高纯  $\text{H}_2$  瓶 7 中的气体纯度为  $99.99\text{vol}\%\sim 99.99999\text{vol}\%$ 。
- [0045] [0032] 所述柱塞泵 15 的液体流量调节范围为  $0\sim 1\text{ml}/\text{min}$ 。
- [0046] [0033] 所述不锈钢管可以是 304 不锈钢管或者 316 不锈钢管或者 316L 不锈钢管。
- [0047] [0034] 所述第一流量控制计 5 和第二流量控制计 11 的流量控制范围为  $0\sim 500\text{ml}/\text{min}$ 。
- [0048] [0035] 所述蒸发器 17 温度调节范围为  $100\sim 500^\circ\text{C}$ 。
- [0049] [0036] 所述伴热带 19 温度调节范围为  $100\sim 130^\circ\text{C}$ 。
- [0050] [0037] 所述氢化物反应床 24 可以是石英管或者 304 不锈钢管或者 316 不锈钢管或者 316L 不锈钢管。
- [0051] [0038] 所述氢化物材料和玻璃珠混合物 27 中, 氢化物的质量范围  $0\sim 10\text{g}$ , 玻璃珠的直径范围为  $2\sim 6\text{mm}$ 。
- [0052] [0039] 所述电炉 25 取决于氢化物反应床的大小, 有可能是三段炉, 以获得更长的聚温区。所述电炉 25 的温度控制范围为  $100\sim 500^\circ\text{C}$ 。
- [0053] [0040] 所述低温水浴 29 输出的冷却水温度为  $0\sim 20^\circ\text{C}$ 。
- [0054] [0041] 所述数据采集及控制装置可能是数据采集卡也有可能是 PLC 及 PLC 模块。
- [0055] [0042] 所述气体干燥器 32 中填充的吸水物质为硅胶, 无水硫酸铜、无水  $\text{CaCl}_2$  或者  $\text{CaO}$  等。
- [0056] [0043] 所述的气体减压阀 2、8 输出的压力调节范围为  $0.1\sim 4\text{MPa}$ 。
- [0057] [0044] 所述控制软件是通过 VB、VC 或者 LabVIEW 编程获得。
- [0058] [0045] 下面以  $\text{NaBH}_4$  材料的测试过程为例介绍整个系统、测试方法及所获得的测试结果。首先将  $1\text{gNaBH}_4$  颗粒与  $4\text{mm}$  玻璃珠进行均匀混合, 然后装入不锈钢氢化物反应床 24 之中, 然后混合物 27 的两端塞上石英棉 26, 通过调整确保  $\text{NaBH}_4$  和玻璃珠的混合物 27 处于反应床 24 中央, 然后将氢化物反应床上测温仪表 23 的热电偶插入混合物 27 的中央, 然后将氢化物反应床 24 放入 DC-R3/11 管式电炉 25 中, 并且保证氢化物反应床中间的位置与 DC-R3/11 管式电炉 25 中间的位置。将管式电炉 25 的控温仪表设置到  $115^\circ\text{C}$ , 升温速率为  $5^\circ\text{C}/\text{s}$ 。将 THD-1005 低温水浴 29 的温度设置到  $5^\circ\text{C}$ , 伴热带 19 的控温仪表 21 的温度设置为  $110^\circ\text{C}$ , 将 WATERS510 可编程柱塞泵 15 的液体流量设置为  $0.11\text{mL}/\text{min}$ , 将高纯  $\text{N}_2$  瓶 1 前端的 SS49-33MT 流量控制计 5 的流量设置为  $200\text{SCCM}$ , 将高纯  $\text{H}_2$  瓶 7 前端的流量控制计 11 设置为  $200\text{SCCM}$ , 蒸发器控温仪表 18 的温度设置为  $150^\circ\text{C}$ 。然后打开高纯  $\text{N}_2$  瓶 1 前端的球阀, 对整个系统进行吹扫, 吹扫时 SS49-33MMT 流量计的出口钢管不插到广口瓶 35 而直接通向大气。吹扫  $5\text{min}$  后, 关闭球阀 4, 然后将流量计的出口钢管重新插回广口瓶 35。启动蒸发器 17、伴热带 19、DC-R3/11 管式电炉 25、THD-1005 低温水浴 29。待各部分达到设定温度后, 打开高纯  $\text{H}_2$  瓶 7 前端的球阀 10 和打开 SS49-33MT 流量控制计 11。这样  $\text{H}_2$  和水蒸气的混合气就源源不断的通过主气管和盘管 22 进入氢化物反应床 24 中。同时通过计算机 38 严格监控 GC7890A 气相色谱仪 33 的混合气体成分输出数据, 确保气体干燥器 32 正常工作, 所输出的气体为  $\text{H}_2$ 。控制软件按照上述计算方法输出在  $115^\circ\text{C}$  下, 纯水流量为  $0.11\text{mL}/\text{min}$  条件下的  $\text{NaBH}_4$  蒸汽水解放氢动力学测试曲线(横坐标为时间, 纵坐标为实时产氢率) 如图

2 所示。并通过排水集气法和量筒 36 的液位高,计算出该条件下最大产氢率为 92%,从而表明氢化物蒸汽水解是一种非常具有发展前途的制氢方式。

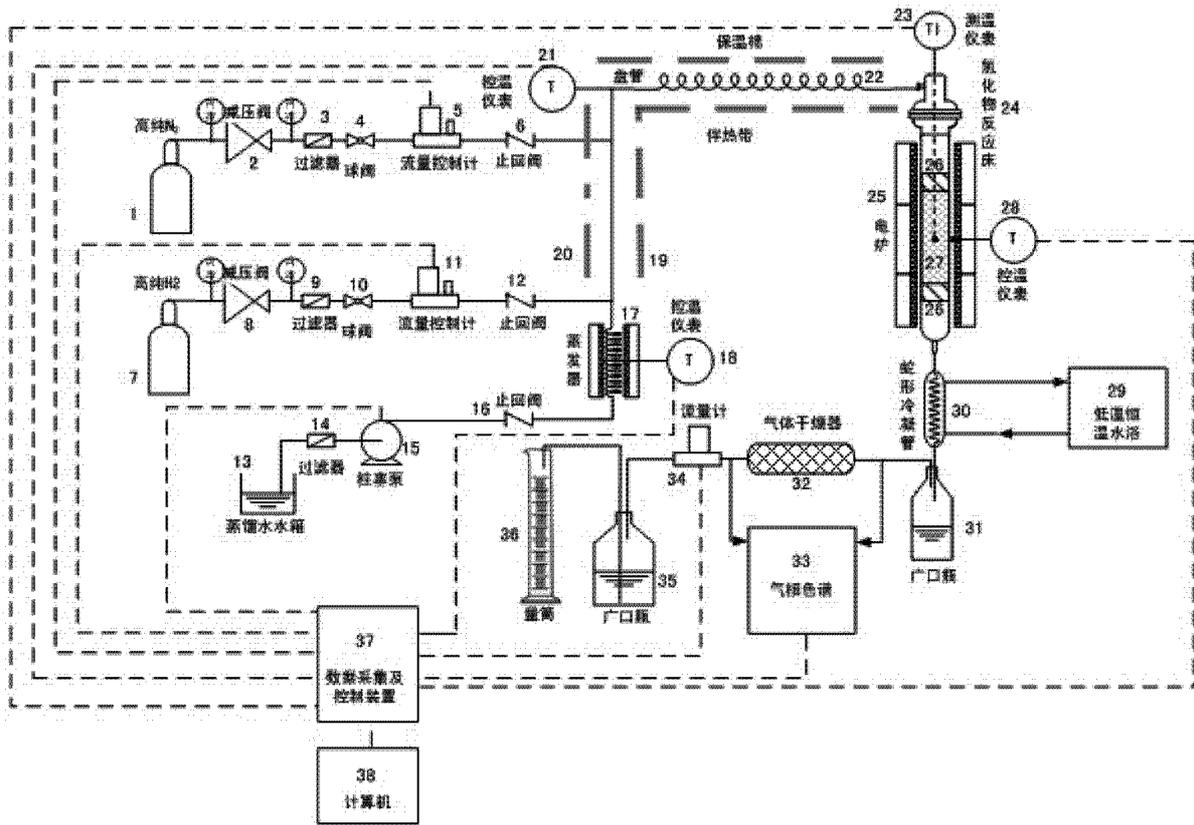


图 1

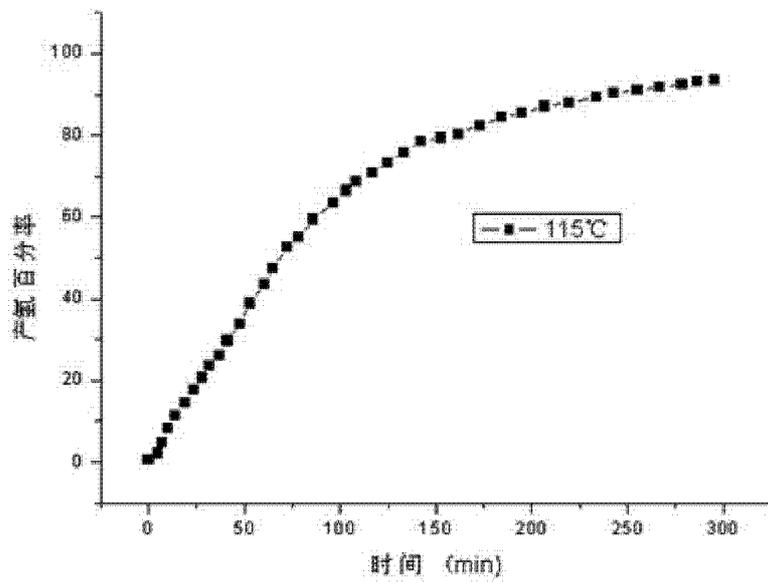


图 2