

文章编号:0253-4339(2025)05-0032-07

doi:10.12465/j.issn.0253-4339.2025.05.032

氢液化与低温储运

## 液氮温区固体吸附储氢系统实验研究

金苏柯<sup>1</sup> 黄轩<sup>2</sup> 邵东亮<sup>1</sup> 余萌<sup>1</sup> 谢军龙<sup>3</sup> 陈建业<sup>3</sup>

(1 江苏省特种设备安全监督检验研究院 南京 210009; 2 华中科技大学中欧清洁与可再生能源学院 武汉 430074;  
3 华中科技大学能源与动力工程学院 武汉 430074)

**摘要** 通过搭建低温吸附储氢系统实验平台,研究系统级的低温吸附储氢规律,探究低温吸附储氢的动力学、热力学特性及整个系统的储氢性能。实验结果表明:在液氮温区条件下,吸附材料表现出优异的储氢能力,吸附材料在充气压力为5 MPa,最终压力为3.04 MPa的工况下,系统的吸附质量比达到5.02%,总储氢密度达到16.63 kg/m<sup>3</sup>,表明系统具有较好的储氢容量。通过实验研究,进一步揭示了影响储氢性能的关键因素,主要包括吸附材料的微观结构特性、吸附过程中的热力学效应以及实验操作条件等,为优化储氢系统性能提供了重要的实验依据。

**关键词** 低温吸附;储氢性能;多孔材料;液氮温区

中图分类号:TK91;TQ116.2

文献标识码:A

## Experimental Study of Solid-State Adsorption Hydrogen Storage System in Liquid Nitrogen Temperature Zone

Jin Suke<sup>1</sup> Huang Xuan<sup>2</sup> Shao Dongliang<sup>1</sup> Yu Meng<sup>1</sup> Xie Junlong<sup>3</sup> Chen Jianye<sup>3</sup>

(1. Special Equipment Safety Supervision Inspection Institute of Jiangsu Province, Nanjing, 210009, China; 2. China-EU Institute for Clean and Renewable Energy at Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074, China; 3. School of Energy and Power Engineering at Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074, China)

**Abstract** In this study, an experimental platform for cryo-adsorption and hydrogen storage systems was constructed to investigate the cryo-adsorption hydrogen storage law in the system and explore the kinetic and thermodynamic properties of cryo-adsorption hydrogen storage and the hydrogen storage performance of the entire system. The experimental results demonstrated that the adsorbent material exhibited an excellent hydrogen storage capacity under liquid nitrogen temperature zone conditions, and the adsorbent material demonstrated a high hydrogen storage capacity reaching mass-weight ratio of 5.02%, equivalent to the total hydrogen storage density of 16.63 kg/m<sup>3</sup> under a charging pressure of 5 MPa and final storage pressure of 3.04 MPa. Through experimental research, the key factors affecting the hydrogen storage performance were revealed. These factors include the microstructural properties of the adsorbent materials, thermodynamic effects during the adsorption process, and experimental operating conditions. This experimental basis provides a foundation for optimizing the performance of hydrogen storage systems.

**Keywords** cryo-adsorption; hydrogen storage performance; porous materials; liquid nitrogen temperature zone

氢能是一种储量丰富、热值高、可储存、可再生、零碳排放的清洁二次能源。随着全球对减少碳排放和寻找可持续能源解决方案的关注度不断提高<sup>[1-2]</sup>,氢能正逐渐成为替代传统化石燃料的重要选择之一<sup>[3-4]</sup>。安全高效的氢储存技术是实现氢能应用的基础<sup>[5-6]</sup>。但常温常压下的氢气密度低<sup>[7]</sup>,通过一些特定的储存方式可以大幅提高氢气的密度。氢气的储存目前主要有4种方式:1)高压气态储氢<sup>[8]</sup>;2)低温液态储氢<sup>[9-11]</sup>;3)化学储氢<sup>[12]</sup>;4)物理固态储氢。

其中,固态吸附储氢具有良好的应用前景,通过物理吸附将氢气储存在固体材料中,采用比表面积较大的多孔吸附剂如多孔活性炭、MOFs (metal-organic frameworks,金属有机框架)等进行高密度储存<sup>[13]</sup>,避免了高压和极低温的苛刻条件,具有安全性好、运输方便和动态特性快、纯度高等优势<sup>[14-15]</sup>,但其吸附和脱附过程中的热效应限制了其实际的储氢效率。

深低温下的固体吸附储氢是一种利用多孔材料在低温条件下物理吸附氢气的技术,通常结合高压以

提高储氢容量。C. Carpetis 等<sup>[16]</sup>在 1980 年最早提出了采用活性炭在低温环境下来吸附储存氢气。N. Bimbo 等<sup>[17]</sup>确定了使用固体吸附储存有正向收益的压力和温度范围,并预测了其最高承受压力。R. Balderas-Xicohtencatl 等<sup>[18]</sup>在 77 K、2~2.5 MPa 下研究了各种 MOFs 的绝对体积吸附量,发现材料的体积吸附量可以通过改善其体积表面积来增加。M. Hirscher 等<sup>[19]</sup>对比了包括 MOF、活性炭和 Mg 基材料等一系列储氢材料的体积绝对吸收量与质量吸收量的关系,相比于 MOFs 吸附材料,活性炭吸附材料在化学稳定性、热稳定性、再生性及重复利用性上具有更大的优势。Ning G. Q. 等<sup>[20]</sup>研究表明,多壁碳纳米管在室温下可释放 H<sub>2</sub> 质量比均小于 0.3%,而在 77 K 下可释放 H<sub>2</sub> 质量比可达 2.27%。液氮温区下的储氢容量达到了常温下的 10 倍。

目前,对于吸附储氢的研究主要集中在改进吸附材料的比表面积和微孔容积以提高材料的储氢密度,对于吸附储氢在液氮温区下的机理和系统级的低温吸附储氢装置研究较为缺乏。因此,本文建立了小型低温吸附储氢系统,研究系统级下的多孔吸附材料在液氮温区的吸附规律。该低温吸附储氢实验系统主要包括低温冷却系统、高压充氢系统、数据采集系统及安全防护系统 4 个部分。在不同预设压力下进行低温吸附储氢实验,记录温度、压力及质量流量等参数来研究整个储氢装置的温度分布、吸附性能等。

## 1 实验系统

### 1.1 低温吸附储氢罐结构设计

低温吸附储氢技术是在固态吸附储氢基础上发展而来的一种新型储氢方法,其工作温度范围从常温扩展至液氮温区。该技术具有如下显著优势:

在液氮温区下,吸附材料表现出显著增强的氢吸附能力,从而大幅提升了系统的氢能密度。其次,基于吸附过程固有的选择性特征,低温吸附储氢系统能够产出高纯度氢气,纯度通常可达 99.99% 以上。与常规高压储氢技术相比,低温吸附储氢在实现相近能量密度的条件下,可将系统工作压力显著降至 10 MPa 以内。该特性不仅降低了对压力容器的强度要求,同时也有效减少了高压储氢带来的安全隐患。从动力学角度来看,低温吸附储氢过程具有高度可逆性。通过简单的热管理手段(如加热等升温方法),即可实现氢气的快速脱附,这为系统的快速充放氢循环提供了技术保障。此外,低温吸附储氢系统的模块化设计特征使其在分布式能源系统中具有显著优势,

降低了对大规模基础设施的依赖,有利于氢能技术的推广应用。

储氢罐结构如图 1 所示。储氢罐整体结构主要包括外置杜瓦瓶、罐体、密封圈、法兰盘、充放气管路及航空插头引管等。

充放气管路设计为下进上出,将充气入口设计在储氢罐下端,当温度较高的氢气进入预冷完成的储罐后由于气体的密度差上升,能够在储罐内形成良好的气体循环,使气体与吸附剂充分接触达到更好的吸附效果。

温度波动和极端低温条件可能会对电信号的传输产生影响,导致测量误差增加。保持航空插头连接处于相对稳定的温度环境中有助于维持电信号的完整性和准确性。并且热电偶需要准确的冷端补偿来修正由于环境温度变化引起的误差。若数据采集器及其相关电路能够放置在一个温度相对稳定且可测量的区域,则更容易实现精确的冷端补偿。因此,储氢罐设计了 1 个内径为 19.16 mm、长度为 350 mm 的引管将航空插头连接处移动至温度波动较小的室温环境中来保证热电偶温度测量的准确性。

由于储罐中心部分距离液氮冷却区域较远,中心部分的吸附热难以被冷却系统带走。为了提高储氢罐内部的温度场均匀性,在储罐中心处设置了一个下沉槽作为冷源用于带走储罐中心处产生的吸附热。

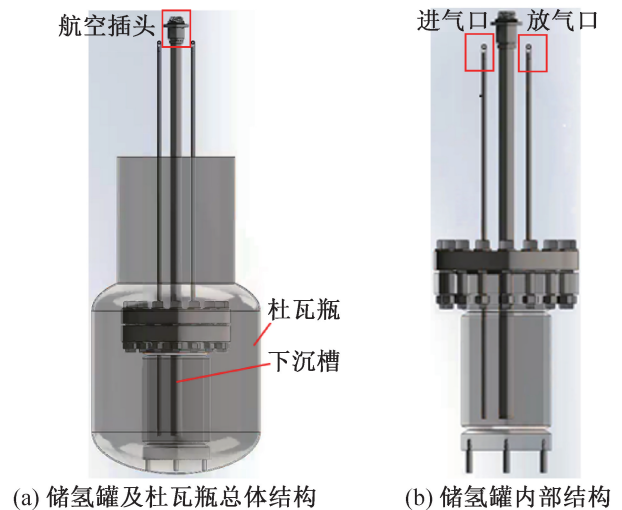


图 1 储氢罐结构

Fig.1 Structural schematic of H<sub>2</sub> storage tank

为反映出整个储氢系统的温度场变化规律,本实验设置了 9 个热电偶温度监测点,如图 2 所示。其中,c1~c8 监测点用于反映整个储罐的总体温度场,c9 点用于监测氢气的进口温度。

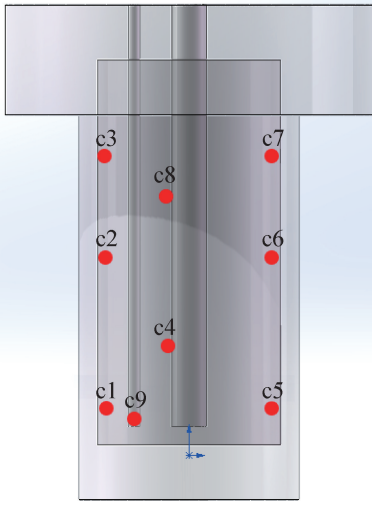


图2 温度监测点布置

Fig.2 Arrangement of temperature monitoring points

## 1.2 低温吸附储氢实验平台构建

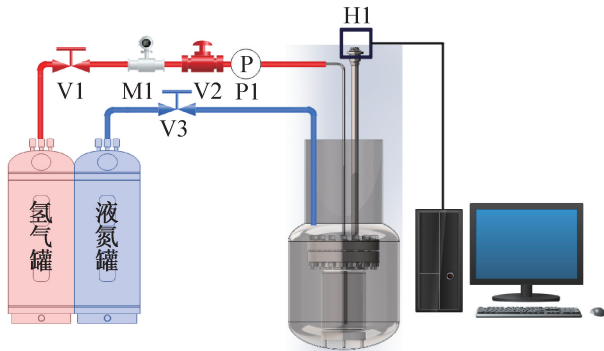
本实验选用具有代表性孔隙特征的活性炭 YP-80F 作为吸附剂,其结构参数与热物性参数如表 1 所示。实验系统主要由低温冷却系统、高压充氢系统、数据采集系统及安全防护系统 4 部分组成,实验系统及对应的实验台实物分别如图 3、图 4 所示。储氢罐体积为 1.58 L,引管体积为 0.1 L;罐体内径为 100 mm,罐体高度为 210 mm,罐壁厚度为 10 mm,法兰直径为 196 mm,厚度为 30 mm,充放气管路外径均为 6.35 mm,管厚为 0.89 mm;储罐中心部分设置直径为 19.16 mm,深度为 200 mm 的冷却孔用于带走中心部分产生的吸附热。罐内布置 9 个温度测点通过航空插头将数据传输至数据采集器。

表 1 YP-80F 物性参数

Tab.1 Physical properties of YP-80F

密度/(kg/m <sup>3</sup> )	导热系数/[W/(m·K)]	比热/[J/(kg·K)]	孔隙度	颗粒平均直径/mm	比表面积/(m <sup>2</sup> /g)
712.6	$k_{py}^*$	810	0.755	0.1	2 155

注: $k_{py}^* = 0.01 \times (-16.8 + 0.73T - 1.9 \times 10^{-3}T^2 + 1.53065 \times 10^{-6}T^3)$



V1 减压阀;V2 控制阀;V3 低温针阀;M1 氢气质量流量计;P1 压力传感器;H1 防爆航空插头。

图3 实验系统

Fig.3 Experimental system



图4 实验台架

Fig.4 Experimental bench

## 1.3 数据处理及误差分析

在系统完成整个休眠阶段后,储氢罐压力与温度达到热力学平衡状态,根据美国国家标准与技术研究院(NIST, National Institute of Standards and Technology)开发的流体热物性性质数据库,精确获取对应温度、压力下的氢气密度参数。基于质量守恒定律,根据式(1)计算得到气态氢的质量变化量。总充气质量与气态氢质量变化量的差值即为吸附氢质量变化量,其表达式如式(2)所示。

$$m_g = (\rho_1 - \rho_0) V \varepsilon_b \quad (1)$$

$$m_a = m_t - m_g \quad (2)$$

式中: $\rho_0$  为初始状态下( $p_0 = 101 \text{ kPa}$ ,  $T_0 = 77.15 \text{ K}$ )的气态氢密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\rho_1$  为休眠阶段结束时的气态氢密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $V$  为吸附床总体积,  $\text{L}$ ;  $\varepsilon_b$  为吸附床孔隙度;  $m_g$  为气态氢质量,  $\text{g}$ ;  $m_a$  为吸附态氢质量,  $\text{g}$ ;  $m_t$  为总充气质量,  $\text{g}$ 。

进一步采用式(3)和式(4)分别计算出系统的关键储氢性能指标:吸附质量比( $W_t$ )及总体积储氢密度。吸附质量比表征单位质量吸附材料的储氢能力,计算式为:

$$W_t = m_a / m_b \quad (3)$$

式中: $m_b$  为充注吸附剂质量,  $\text{g}$ 。而总体积储氢密度

则反映系统的空间存储效率,计算式为:

$$\rho_{vol} = m_l/V \quad (4)$$

式中: $\rho_{vol}$  为总体积储氢密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。通过该计算方法,可有效区分物理吸附与压缩储氢的贡献度,为评估材料吸附性能提供定量分析依据。

低温吸附储氢吸附实验误差主要来源于测量仪器精度误差、环境条件波动误差、不同批次材料特性差异、实验方法误差、操作者人为误差及数据舍入误差等。在排除人为误差及实验方法误差的前提下,实验主要的不可控误差来源于测量仪器精度误差。

本实验中直接测量数据为储氢罐内的监测点温度、储罐的储氢压力、氢气充气质量流量及吸附剂质量;间接测量数据为气态氢质量、吸附氢质量及储氢密度。根据误差传播定律,对于一个由多个变量组成的函数  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 可通过求偏导数来估计各输入变量对输出变量的影响。间接测量量的总不确定度  $\Delta f$  可用下式近似计算:

$$(\Delta f)^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 (\Delta x_1)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 (\Delta x_2)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 (\Delta x_n)^2 \quad (5)$$

式中: $x_i$  为测量仪器的直接测量值,各测量值之间相互独立。本实验中储氢系统的气态氢质量、吸附氢质量、吸附质量比等间接测量数据的误差计算如下:

$$\frac{\delta m_g}{m_g} = \sqrt{\left(\frac{\delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\delta p}{p}\right)^2} \quad (6)$$

$$\frac{\delta m_a}{m_a} = \sqrt{\left(\frac{\delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\delta p}{p}\right)^2 + \left(\frac{\delta m_l}{m_l}\right)^2} \quad (7)$$

$$\frac{\delta W_l}{W_l} = \sqrt{\left(\frac{\delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\delta p}{p}\right)^2 + \left(\frac{\delta m_l}{m_l}\right)^2 + \left(\frac{\delta m_b}{m_b}\right)^2} \quad (8)$$

T 型低温热电偶最大不确定度为  $\pm 1.5 \text{ K}$ , 电子天平的最大不确定度为  $\pm 0.03 \text{ g}$ , 压力传感器和氢气流量计精度等级均为 0.5, 具体的直接测量数据误差分析如表 2 所示。

表 2 实验误差分析

Tab.2 Error analysis

参数	传感器	量程	精度	最大误差
温度	T 型热电偶	73.15~533.15 K	$\pm 1.5 \text{ K}$	1.5 K
储罐压力	压力传感器	0~10 MPa	0.5% FS	0.05 MPa
氢气质量流量	氢气流量计	0~0.2 g/s	0.5% FS	0.001 g
吸附剂质量	电子天平	0~3 000 g	$\pm 0.03 \text{ g}$	0.03 g

测量过程中,热电偶的测量范围为 75~120 K, 压

力测量范围为 0~5 MPa, 质量流量范围为 0~0.19 g/s, 电子天平测量范围为 0~300 g。根据误差传播定律公式,可以计算出气态氢质量、吸附氢质量、吸附质量比的不确定性分别为 1.6%、1.69%、1.69%。

## 2 吸附性能及特性分析

### 2.1 动力学特征分析

基于 PCT 测试方法测量吸附材料的等温吸附曲线,采用贝士德仪器科技有限公司生产的 BSD-PH 全自动高温高压气体吸附仪,在 77.35、149.95、298.15 K 这 3 种恒定温度及 0~7 MPa 压力范围内,将约 400 mg 的 YP-80F 样品在 100 Pa、120 °C 的条件下真空脱气 12 h 至样品恒重后放置于仪器内的样品管中,首先通入氦气作为标定气体,用于测定样品体积和样品管剩余空间体积。随后缓慢充入氢气,待系统达到平衡状态后,记录各平衡点的压力值及对应的氢吸附量。吸附材料的吸氢质量比和氢气压力变化如图 5 所示。结果表明:在 77.35 K 低温条件下,材料表现出最快的吸附动力学特性,达到吸附平衡所需时间明显短于 149.95 K 的温度条件,吸附速率与温度呈现显著的负相关性。该现象可归因于低温环境下增强的气固相互作用力以及提高的氢气扩散速率。

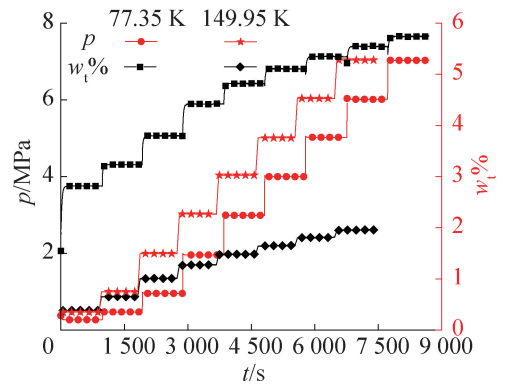


图 5 不同温度下的吸附速率曲线对比

Fig.5 Mass-weight ratio curves with various temperatures and pressures

### 2.2 热力学特征分析

不同充气压力工况下储氢罐的压力、温度变化分别如图 6、图 7 所示。由图 6 可知,在充气阶段,充入的氢气速率明显超过多孔材料的吸附速率,罐内气态氢质量不断增加,罐内压力急剧升高,在充气结束时达到预设压力,罐内压力分布均匀;在休眠阶段,氢气停止充入,储罐在冷却管的冷却作用下带走吸附热,罐内的气态氢不断被吸附使压力不断缓慢降低,最终趋于稳定平衡状态。

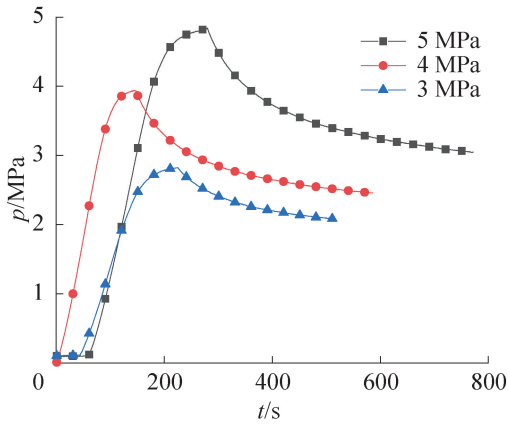


图 6 不同充气压力下储罐的压力变化

Fig.6 Pressure variation in the tank with different charging pressures

通过对温度监测数据的分析可知,储氢罐内的热力学行为呈现显著的空间异质性特征,由于多孔材料吸附氢气产生的吸附热及室温氢气自身携带的热量,使储罐内检测点的温度在充气阶段时均有不同程度的上升,位于进气口下游流道区域的 C4 监测点,由于直接承受氢气对流换热效应,在 3 个测试工况中均表现出最大温升幅度。

值得注意的是,在整个过程中,位于储罐右下方近冷却盘管区域的 c5 监测点表现出最优热管理效果,其温度波动范围仅为 77~82 K,证实了系统设计的径向温度梯度分布特性。

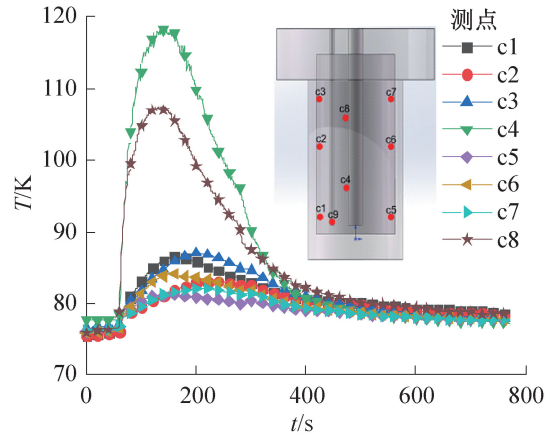
### 2.3 储氢性能分析

4 MPa 充气压力工况下的入口质量流量变化如图 8 所示,总充入氢气质量即为质量流量曲线对时间轴的积分。定压充气的流量曲线图中的 3 个变化阶段具体如下:

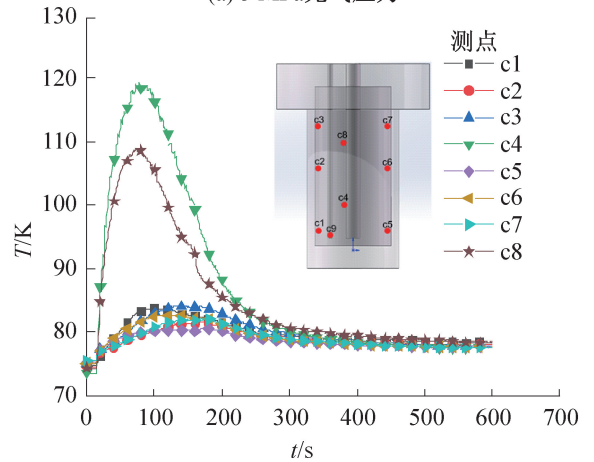
1) 快速填充阶段:当充气开始时,储氢罐内的初始压力远低于设定的目标压力,从气源至储氢罐之间存在较大的压力差,氢气会迅速流向低压区域以平衡压力,质量流量迅速上升至最高点,随着气体流入,储氢罐内的压力迅速上升。

2) 稳定阶段:由于罐内多孔材料随着压力的上升不断将气态氢吸附转化为吸附态氢,当储罐与气源压力差减小至一定程度后,质量流量曲线会保持在一个稳定的数值上下波动。

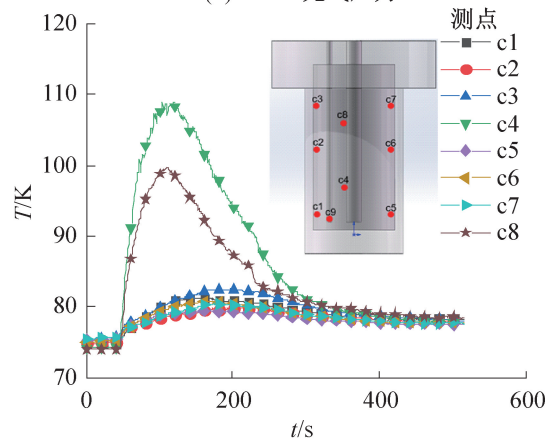
3) 减速填充阶段:当容器内部压力逐渐接近预设压力时,系统呈现出显著的质量传输特征变化。该现象主要源于以下 2 个因素:(1) 容器内外压力梯度显著减小,导致气体驱动力减弱;(2) 多孔吸附材料在当前温度和压力条件下已接近饱和吸附状态,其吸附能力趋于极限。这 2 个因素的共同作用导致气体



(a) 5 MPa 充气压力



(b) 4 MPa 充气压力



(c) 3 MPa 充气压力

图 7 不同充气压力下监测点温度变化

Fig.7 Temperature variation with different charging pressures

质量流量急剧下降,仅有少量气体能够继续进入容器以完成最终的平衡调节。当储罐压力达到预设充气压力的临界值时手动操作关闭控制阀。

实验中充注吸附剂 YP-80F 质量为 275.86 g,吸附床体积为 1.580 L,吸附床密度为 0.174 59 g/cm<sup>3</sup>,多孔材料 YP-80F 的骨架密度为 1.85 g/cm<sup>3</sup>,微孔体积为 0.863 cm<sup>3</sup>/g,整个吸附床孔隙度为 75.5%。不同充气压力工况下的储氢性能对比如表 3 所示,在

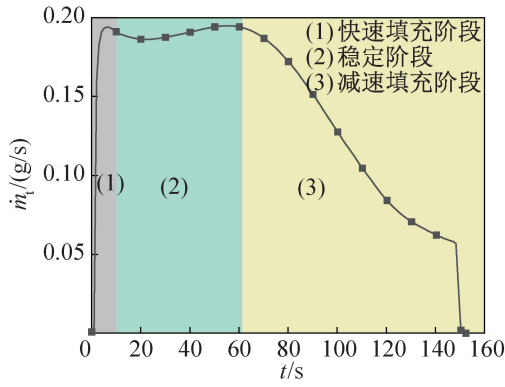


图 8 4 MPa 充气压力下的入口质量流量变化  
Fig.8 Variation of inlet mass flow rate at the charging pressures of 4 MPa

定压充气的条件下,充气压力越高,整个储氢系统的储氢密度越高,整个充气休眠阶段达到最终吸附平衡所需的时间也越多,同时最终的储氢压力也越高。当充气压力为 5 MPa 时,最终压力为 3.04 MPa,储氢系统的吸附质量比能达到 5.02%,总储氢密度达到 16.63 kg/m<sup>3</sup>。

表 3 不同充气压力工况下的储氢性能

Tab.3 Hydrogen storage performance at different charging pressures

参数	工况 I	工况 II	工况 III
充气压力/MPa	3.00	4.00	5.00
最终压力/MPa	2.08	2.46	3.04
总充入质量/g	18.91	21.88	26.27
气态氢增量/g	8.30	9.93	12.42
吸附氢增量/g	10.61	11.95	13.85
充气阶段时间/s	185	151	224
休眠阶段时间/s	394	440	492
吸附质量比/%	3.85	4.33	5.02
总储氢密度/(kg/m <sup>3</sup> )	11.97	13.85	16.63

### 3 结论

本文搭建了液氮温区吸附储氢系统的实验台,研究了低温吸附储氢规律,探究低温吸附储氢的动力学、热力学特性及不同工况下的储氢性能,得到如下结论:

1)各工况温升最高的 c4、c8 点温度最高为 100~120 K,这表明冷却系统的热负荷处理能力在充气阶段内足以消除大部分的显热和吸附热,储罐整体均温性较好。

2)随着充气压力的升高,系统整体储氢密度及吸附质量比均增大,但同时达到吸附平衡所需时间成本更大且最终储存压力也会升高。

3)在液氮温区条件下,吸附材料表现出优异的储氢能力,吸附材料在充气压力为 5 MPa,最终压力为 3.04 MPa 的工况下,系统的吸附质量比达到 5.02%,总储氢密度达到 16.63 kg/m<sup>3</sup>。

本文受江苏省特检院科技计划项目 (KJ(Y)202405) 和江苏省“双创”博士项目 (JSSCBS20230188) 资助。(The project was supported by S&T Program of Special Equipment Safety Supervision Inspection Institute of Jiangsu Province (No. KJ(Y)202405) & Jiangsu Provincial Double-Innovation Doctor Program (No. JSSCBS20230188).)

### 参考文献

[1] 周峰,王芮敏,马国远,等.我国数据中心碳中和路径情景分析[J].制冷学报,2025,46(1):79-85. (ZHOU Feng, WANG Ruimin, MA Guoyuan, et al. Scenario analysis of data centers in China under carbon neutrality target[J]. Journal of Refrigeration, 2025, 46(1): 79-85.)

[2] 张春伟,陈静,王成刚,等.相变储能技术的传热强化方法综述[J].制冷学报,2023,44(1):1-13. (ZHANG Chunwei, CHEN Jing, WANG Chenggang, et al. Review on heat transfer enhancement methods of latent heat storage technology [J]. Journal of Refrigeration, 2023, 44(1): 1-13.)

[3] HUA Zhengli, GAO Wei, CHI Shuanghe, et al. Development status and challenges of high-pressure gaseous hydrogen storage vessels and cylinders in China [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025, 214: 115567.

[4] ZAVALA V R, PEREIRA I B, DA SILVA VIEIRA R, et al. Challenges and innovations in green hydrogen storage technologies [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 113: 322-339.

[5] ZHANG Tiance, WANG Jianxiao, ZHONG Haiwang, et al. Soft open point planning in renewable-dominated distribution grids with building thermal storage[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023, 9(1): 244-253.

[6] BRÄNDLE G, SCHÖNFISCH M, SCHULTE S. Estimating long-term global supply costs for low-carbon hydrogen[J]. Applied Energy, 2021, 302: 117481.

[7] REN J, MUSYOKA N M, LANGMI H W, et al. Current research trends and perspectives on materials-based hydrogen storage solutions: a critical review [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(1):

- 289–311.
- [8] YIN Zhuocheng, ZHANG Fuqiang, DUAN Wenyi, et al. Analysis and prospect of key technologies of hydrogen energy storage and transportation[J]. *American Journal of Chemical Engineering*, 2022, 10(1): 11.
- [9] ISHIMOTO Y, VOLDSUND M, NEKSÅ P, et al. Large-scale production and transport of hydrogen from Norway to Europe and Japan; value chain analysis and comparison of liquid hydrogen and ammonia as energy carriers [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(58): 32865–32883.
- [10] QYYUM M A, RIAZ A, NAQUASH A, et al. 100% saturated liquid hydrogen production; mixed-refrigerant cascaded process with two-stage ortho-to-para hydrogen conversion [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 246: 114659.
- [11] 花亦怀, 李秋英, 程昊, 等. 正仲氢催化转化机理研究综述[J/OL]. *制冷学报*, 2024; 1–14. (2024–10–29) [2025–04–18]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2182.tb.20241028.1533.004.html>. (HUA Yihuai, LI Qiuying, CHENG Hao, et al. Review on catalytic conversion mechanism of ortho-para hydrogen [J/OL]. *Journal of Refrigeration*, 2024; 1–14. (2024–10–29) [2025–04–18]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2182.tb.20241028.1533.004.html>.)
- [12] SPATOLISANO E, RESTELLI F, MATICHECCHIA A, et al. Assessing opportunities and weaknesses of green hydrogen transport via LOHC through a detailed techno-economic analysis [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 52: 703–717.
- [13] SZCZEŚNIAK B, CHOMA J, JARONIEC M. Gas adsorption properties of hybrid graphene-MOF materials [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2018, 514: 801–813.
- [14] BAO Wenzhe, YU Junwei, CHEN Feifei, et al. Controllability construction and structural regulation of metal-organic frameworks for hydrogen storage at ambient condition; a review [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(92): 36010–36034.
- [15] ABDECHAFIK E H, AIT OUSALEH H, MEHMOOD S, et al. An analytical review of recent advancements on solid-state hydrogen storage [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 52: 1182–1193.
- [16] CARPETIS C, PESCHKA W. A study on hydrogen storage by use of cryoadsorbents [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1980, 5(5): 539–554.
- [17] BIMBO N, TING V P, SHARPE J E, et al. Analysis of optimal conditions for adsorptive hydrogen storage in microporous solids [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2013, 437: 113–119.
- [18] BALDERAS-XICOHTÉNCATL R, SCHLICHTENMAYER D M, HIRSCHER D M. Volumetric hydrogen storage capacity in metal – organic frameworks [J]. *Energy Technology*, 2018, 6(3): 578–582.
- [19] HIRSCHER M, YARTYS V A, BARICCO M, et al. Materials for hydrogen-based energy storage – past, recent progress and future outlook [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 827: 153548.
- [20] NING G Q, WEI F, LUO G H, et al. Hydrogen storage in multi-wall carbon nanotubes using samples up to 85 g [J]. *Applied Physics A*, 2004, 78(7): 955–959.

#### 通信作者简介

陈建业,男,博士,副教授,华中科技大学能源与动力工程学院,18868818316, E-mail: jianye\_chen@hust.edu.cn。研究方向:深低温两相流动与传热、低温储氢等。

#### About the corresponding author

Chen Jianye, male, Ph. D., associate professor, School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, 86–18868818316, E-mail: jianye\_chen@hust.edu.cn. Research fields: cryogenic two-phase flow and heat transfer, cryogenic hydrogen storage.