

# 外部控温圆柱形固态储氢罐吸放氢性能实验研究

应 强<sup>1</sup>, 李建立<sup>1</sup>, 李敬法<sup>1</sup>, 闫东雷<sup>2</sup>, 段秉言<sup>1</sup>, 赵 堃<sup>1</sup>

(1. 北京石油化工学院 机械工程学院, 北京 102617; 2. 北京京辉绿氢新能源科技有限公司, 北京 102502)

**摘 要:**外部控温圆柱形固态储氢罐具有结构简单、成本低、易于批量生产和可串并联组合应用等优势。利用自主设计的固态储放氢性能测试装置,对两个具有不同长径比的圆柱形储氢罐的吸放氢性能进行了测试分析,旨在评估其理论储氢性能的实际利用程度,并考察吸放氢温度和压力等参数对其吸放氢性能的影响。结果表明,在不同吸放氢工况下,两实验储氢罐的吸放氢速率均呈现“短时陡升-短时陡降-缓慢趋零”的3阶段特征,累计吸放氢量随时间均呈现“短时陡升-缓慢爬升”的两阶段特征,其中“短时陡升”阶段吸氢时长占吸氢总时长的不足2%,该阶段吸氢速率最高为6.545 L/s,“缓慢趋零”阶段的吸氢速率不足0.5 L/s;由于合金床层活化不完全、芯部换热不充分等原因,两储氢罐吸氢饱和度均小于60%,但可逆放氢率可达90%以上。在初始床层温度不变时,吸放氢总时长和累计吸放氢量均随初始压力升高而增大;在初始吸放氢压力不变时,吸氢总时长、累计吸氢量和吸氢饱和度均与合金初始床层温度负相关,而放氢总时长、累计放氢量和可逆放氢率均与初始床层温度正相关;适当增大储氢罐长径比,可提高综合换热效果,从而改善吸放氢性能。

**关键词:**固态储氢;吸放氢性能;吸氢饱和度;可逆放氢率

中图分类号: TG139+.7; TK91

文献标志码: A

文章编号: 2097-2547(2025)04-149-08

## Experimental study on hydrogen absorption and desorption performances of external temperature-controlled cylindrical solid-state hydrogen storage tanks

YING Qiang<sup>1</sup>, LI Jianli<sup>1</sup>, LI Jingfa<sup>1</sup>, YAN Donglei<sup>2</sup>, DUAN Bingyan<sup>1</sup>, ZHAO Kun<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China; 2. Beijing Jinghui Green Hydrogen New Energy Technology Co., Ltd., Beijing 102502, China)

**Abstract:** External temperature-controlled cylindrical solid hydrogen storage tanks have advantages of simple structure, low cost, easy mass production, and series parallel combination applications. The hydrogen absorption and desorption performance of two cylindrical hydrogen storage tanks with different aspect ratios were tested and analyzed by a self-designed solid-state hydrogen absorption and desorption performance testing device. The aim is to evaluate the actual utilization of their theoretical hydrogen storage capacity and investigate influence of parameters such as hydrogen absorption and desorption temperature and pressure on their hydrogen absorption and desorption performance. The results show that under different hydrogen absorption and desorption conditions, the hydrogen absorption and desorption rate of the two experimental storage tanks exhibits a three-stage characteristic of “short-term steep rise, short-term steep fall and slowly approaching zero”, while the cumulative hydrogen absorption and desorption amount shows a two-stage characteristic of “short-term steep rise and slow climb” over time. The hydrogen absorption time in the “short-term steep rise” stage accounts for less than 2% of the total hydrogen absorption time. The maximum hydrogen absorption rate in this stage is 6.545 L/s, and the hydrogen absorption rate in the “slowly approaching zero” stage is less than 0.5 L/s. Due to incomplete activation of the alloy bed and insufficient heat transfer in the core, within the operating range of this article, the hydrogen absorption saturation is less than 60%, and the reversible hydrogen desorption rate can reach over 90%. When the initial temperature of the bed remains constant, both the total hydrogen absorption and release time and the cumulative hydrogen absorption and release amount increase with the increase of the initial pressure difference. When the initial hydrogen absorption and desorption pressure remains constant, the total hydrogen absorption time, cumulative hydrogen absorption amount, and hydrogen absorption saturation are all negatively correlated with the initial temperature of

收稿日期: 2024-07-11; 修回日期: 2024-08-23。

基金项目: 国家自然科学基金(52372311); 国家市场监督管理总局科技计划项目(2023MK123)。

第一作者: 应 强(1997—), 硕士研究生, 研究方向为金属氢化物固态储氢装置的应用, E-mail: 1419844852@qq.com。

通信作者: 李建立(1979—), 博士, 副教授, 研究方向为储氢技术, E-mail: lijianli\_gz@bipt.edu.cn。

the alloy bed, while the total hydrogen release time, cumulative hydrogen release amount, and reversible hydrogen release rate are positively correlated with the initial temperature of the bed. Appropriately increasing the aspect ratio can significantly improve the comprehensive heat transfer efficiency, thereby significantly enhancing the hydrogen absorption and desorption performance.

**Keywords:** solid state hydrogen storage; hydrogen absorption and desorption performance; hydrogen absorption saturation; reversible hydrogen release rate

固态储氢技术应用场景多样,可用于便携式储氢、长周期大规模固定式储氢、绿电氢储能、燃料电池冷热电三联供氢源、工业生产用高纯氢、交通工具氢燃料储氢、大宗移动式氢运输和氢气纯化等<sup>[1-3]</sup>。固态储氢反应器是固态储氢装置的核心,其储氢量和吸放氢工艺参数根据实际需求设定。一般来讲,体积储氢密度(单位体积储氢合金储存氢气质量)和质量储氢密度(单位质量储氢合金储存氢气质量)大、吸放氢便捷快速、可逆吸放氢次数多和吸放氢过程安全可靠等是对各场景用固态储氢罐性能的基本要求<sup>[4-5]</sup>。研发吸放氢量范围广、吸放氢速率可调性好和组配灵活易于模块化的大型固态储氢装置具有良好的产业化前景<sup>[6]</sup>。

现有研究一方面集中于储氢材料的成分设计、改性和制备工艺优化,另一方面集中于热管理方式的优化设计和效果评估<sup>[7-9]</sup>。对于后一方面,目前研究主要聚焦单体大容量固态储氢罐如何实现快速高效吸放氢的问题,采用仿真和实验等方法开展内部主动换热技术研究,提出并考察多种多样的内部复杂换热结构的热管理效果。DARZI等<sup>[10]</sup>改进了JEMNI等<sup>[11]</sup>研究的罐式反应器,在罐内储氢合金中添加了翅片。结果表明,在保持相同的储氢合金填充量时,内侧分别添加10个、20个翅片,吸氢反应时间从未添加翅片时的350 min分别缩短到125 min、50 min。SINGH等<sup>[12-13]</sup>在类似结构反应器中加入了双U形换热管用于储氢合金吸放氢过程的热管理,在双U形换热管外装有横向翅片,翅片表面均匀分布有直径2 mm的小孔作为氢气通道,储氢合金填充在翅片之间区域。结果表明,与不使用铜翅片的情况相比,使用铜翅片后吸氢时间缩短了11%。当翅片数由4个增加到13个时,装置吸收12 g氢气所用的时间从1180 s缩短到610 s。此外,当翅片数不变时,增大翅片厚度也能增强传热效果。MELLOULI等<sup>[14-15]</sup>系统研究了在固态储氢罐内部增加螺旋换热管、带翅片的单/双螺旋管的控温效果。结果表明,只采用一根不带翅片的螺旋换热管,便可使反应器中氢气量到达80%(9 g)所需时长由5000 s缩短至1000 s,螺旋管上增加翅片后吸氢

速率进一步提升。CHANG等<sup>[16]</sup>提出了一种新型夹层式储氢反应器,将热化学储热材料 $Mg(OH)_2$ 夹在两层 $MgH_2$ 中间,并堆放在圆柱形储罐内。与传统套筒式反应器相比,该反应器传热面积更大、传热热阻更小,从而加快了其传热和储氢速率。此外,研究人员还采用相变材料作为填充材料在换热夹套之间进行换热<sup>[17]</sup>。结果表明,与不含相变材料的反应器相比,该反应器的吸氢速率和放氢速率分别提高了44%和20%。采用不同内部换热构件虽然可以提高吸放氢过程的换热速率,使床层温度更加均匀,缩短吸放氢时间,但是该方法减小了体积内储氢合金填充量,进而减小了储氢罐整体的体积储氢密度。此外,从便于工程实践应用和产业化、提高经济性等角度来讲,过于复杂的内部主动热管理结构及方式在可行性方面会存在问题。与此相对应,外部控温圆柱形固态储氢罐具有设备结构简单、成本低、易批量生产和组配灵活等突出优点,既可作单个储氢罐独立应用,又便于多设备串并联使用,可满足大储氢量、快速充放氢的使用要求,更易实现产业化。

从应用基础研究来讲,基于外部热管理技术的简单圆柱形金属储氢罐的开发应用还存在许多问题。本研究针对罐体长径比对储放氢性能的影响和在内部无换热构件且不同工况运行时其内部储氢合金床能否完全吸放氢等实际问题开展实验研究。通过自主研制固态储氢罐及其吸放氢实验装置,改变罐体外部水浴温度、吸氢压力(储氢罐罐内与罐外的差值,其中罐外压力为大气压),测试储氢罐的吸氢性能;改变罐体外部水浴温度、储氢罐内初始压力,测试其放氢性能(放氢出口压力为大气压);评估储氢罐在不同初始温度、吸氢压力和放氢时罐内初始压力条件下的整体吸放氢性能。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料

实验材料见表1。钛锰系合金具有质量储氢密度高、吸放氢速率快、吸放氢温度接近常温和可逆循环寿命长等优点,但其初始活化氢压高( $> 4$  MPa),活化时间较长( $> 24$  h)。向钛锰系合金中添加V、Fe

或 Zr 等改性元素,可改善其吸放氢性能,从而有望作为绿氢大规模长周期储存介质和氢燃料电池配套氢源。测试了 20 °C(代表常温情况)、80 °C(代表高温情况)下钛锰系合金储氢量与其平衡压力关系,不同温度下压力-成分-温度(PCT)曲线见图 1,并以此设计实验方案。

表 1 实验材料

Table 1 Experimental materials

实验材料	规格	厂家
钛锰系合金	质量储氢密度 1.74%	京氢未来新能源科技(北京)有限公司
氢气	体积分数 99.999%	北京环宇京辉京城气体科技有限公司
氮气	体积分数 99.999%	北京环宇京辉京城气体科技有限公司

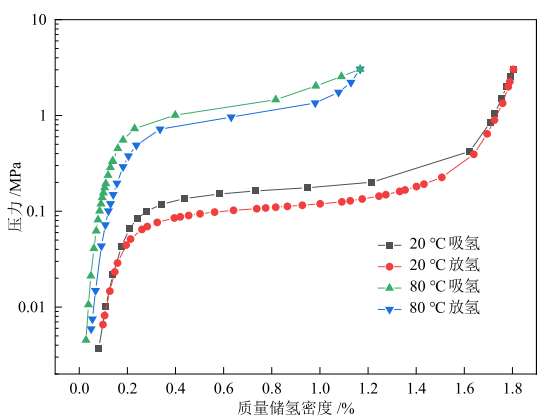
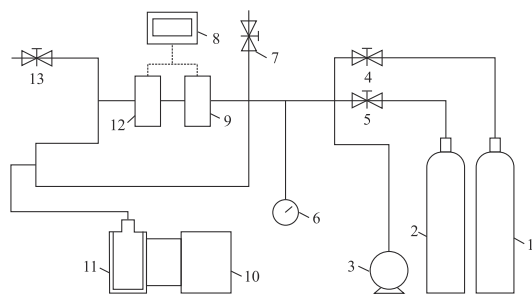


图 1 不同温度下锰钛系合金的 PCT 曲线

Fig. 1 PCT curves of manganese titanium alloys at different temperatures

1.2 实验装置

固态储氢罐及其吸放氢实验装置为自主研制,装置示意图见图 2。



1—氮气瓶;2—氢气瓶;3—真空泵;4—氮气减压阀;5—氢气减压阀;6—真空压力表;7—排空安全阀;8—数据采集系统;9—氢气质量流量计;10—恒温水浴锅;11—固态储氢罐;12—压力传感器;13—单向阀。

图 2 固态储氢罐及配套吸放氢实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of solid-state hydrogen storage tank and supporting hydrogen absorption and desorption experimental device

实验装置所含主要硬件如下:

(1)固态储氢罐分为小长径比(长度与直径比为 1.2,304 不锈钢材质)A 罐和大长径比(长度与直径

比为 8.6,316 不锈钢材质)B 罐两种。A 罐(图 3(a))填充钛锰系合金 3.6 kg,按合金质量储氢密度 1.74% 计算(下同),理论储氢量为 63 g;B 罐(图 3(b))填充钛锰系合金 30.0 kg,理论储氢量为 552 g。

(2)吸放氢管路:管路中的阀门、快插接口和承压管道等均为 316 不锈钢材质。

(3)吸放氢参数监测器件:主要指氢气质量流量计、氢气压力表和恒温水浴测温计。

(4)热管理设备:指可调温恒温水浴箱。

(5)辅助设备:主要指真空泵及抽真空管路系统、便携式氢气泄漏监测仪和红外热像仪。

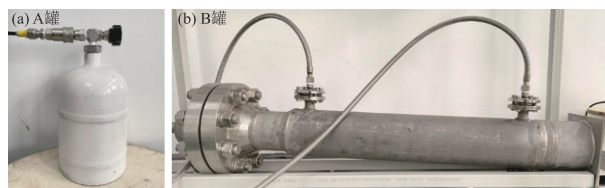


图 3 两种不同长径比的固态储氢罐

Fig. 3 Two types of solid-state hydrogen storage tanks with different aspect ratios

当以 A 罐进行实验时,直接将其浸没于恒温水浴中,由三角铁架支撑(接触面积忽略不计,可认为 A 罐悬浮于恒温水中,外表面各处换热条件一致),通过设置恒温水浴温度并保证足够长的浸泡时间,可获得预期的吸氢/放氢初始状态。当以 B 罐进行实验时,通过循环水管路将恒温水浴中的水引入 B 罐夹套中,实现外部控温目的。在吸放氢实验前,B 罐与循环水充分接触 3 h 以上,以保证实验时罐体及其内部合金温度分布均匀。实验装置中的氢气质量流量计可以精准测量固态储氢罐在吸放氢过程中实际氢气瞬时流量和累计吸放氢量。

1.3 实验方法

实验之前,需对储氢罐内装填的钛锰系合金进行活化处理。该合金活化过程包括去除表面保护性氧化膜、氢分子在金属表面解离、解离氢原子通过表面扩散到块体内部以及与金属相互作用形成氢化物等步骤。其中氧化保护膜的溶解和去除是最困难的,通常需要施加长时间的高压和(或)高温<sup>[18-19]</sup>。

吸放氢之前先采用高纯氮气吹扫实验管路和氢气质量流量计,而后采用真空泵对储氢罐和管路系统抽真空,以保证吸放氢量的测试精度,再进行吸放氢实验。

分别测试了不同罐体外部水浴温度和吸氢压

力时储氢罐的吸氢性能,然后通过改变罐体外部水浴温度和储氢罐内初始压力测试其放氢性能(放氢背压压力为大气压)。最后通过实验结果评估储氢罐在不同初始温度、吸氢压力和放氢时罐内初始压力条件下的整体吸放氢性能,A罐和B罐的吸放氢实验参数见表3。评估吸放氢性能的主要指标

是吸放氢瞬时流量、单次累计吸放氢量、吸放氢过程总时长、吸氢饱和度和可逆放氢率。吸氢饱和度( $S, \%$ )指实际最大吸氢量与理论最大吸氢量的比值,其计算方法见式(1)。可逆放氢率( $\eta, \%$ )指实际最大放氢量与实际最大吸氢量的比值,其计算方法见式(2)。

表3 A罐和B罐的吸放氢实验参数

Table 3 Experimental parameters of hydrogen absorption and desorption of tank A and tank B

固态储氢罐	实验组别	吸氢温度 / $^{\circ}\text{C}$	吸氢压力 /MPa	放氢温度 / $^{\circ}\text{C}$	放氢时罐内初始压力 /MPa	放氢压力 /MPa
A罐	T1	20	1.5	20	1.5	0(表压)
	T2		2.0		2.0	
	T3		2.5		2.5	
	T4		3.0		3.0	
	T5	40	1.5	40	1.5	
	T6		2.0		2.0	
	T7		2.5		2.5	
	T8		3.0		3.0	
	T9	60	1.5	60	1.5	
	T10		2.0		2.0	
	T11		2.5		2.5	
	T12		3.0		3.0	
	T13	80	1.5	80	1.5	
	T14		2.0		2.0	
	T15		2.5		2.5	
	T16		3.0		3.0	
B罐	S1	40	2.0	40	2.0	
	S2	40	2.5	40	2.5	

$$S = \frac{m_{aa}}{m_{ta}} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{m_{ar}}{m_{tr}} \quad (2)$$

式中, $m_{aa}$ 为实际最大吸氢量,g; $m_{ta}$ 为理论最大吸氢量,g; $m_{ar}$ 为实际最大放氢量,g; $m_{tr}$ 为理论最大放氢量(其值与 $m_{aa}$ 相同),g。

## 2 结果与讨论

### 2.1 A罐吸氢性能分析

在初始床层温度(等于水浴温度)分别为20 $^{\circ}\text{C}$ 、40 $^{\circ}\text{C}$ 、60 $^{\circ}\text{C}$ 和80 $^{\circ}\text{C}$ 时,改变A罐吸氢压力(1.5 MPa、2.0 MPa、2.5 MPa和3.0 MPa)进行了实验,结果见图4。由图4可知,在不同吸氢工况下,吸氢速率变化趋势相同,均先快速上升(最高为6.545 L/s),然后迅速下降,随后在较长时间内保持相对稳定吸

氢,呈现“初始陡升-短时陡降-缓慢趋零”的3阶段特征;不同吸氢工况下的累计吸氢量均先快速增大,随后在相对较长时间内缓慢增大,呈现“初始陡升-缓慢爬升”的两阶段特征。

对于吸氢速率:造成“初始陡升”(持续时间不超过25 s,在总时长中占比不超过2%)的原因主要有两方面:(1)大压差(快速)流动占主导,即进气阀打开后,氢气在相对较大的压差驱动下快速流入A罐中的自由空间,瞬时流量主要是压差驱动流量,并非储氢合金的吸氢流量;(2)初始吸氢反应的动力学效应显著,因为初始阶段氢气与储氢合金床层有最大的直接接触面积,且此时储氢合金床层温度较低、氢气扩散阻力也相对较小(氢气扩散通道多且畅通)。在“短时陡降”阶段(约吸氢25~50 s),罐内压力已达到设定的吸氢压力且保持恒定,此后吸氢速率由压力驱动流占主导快速过渡到由氢气在

合金床层中扩散及氢化占主导, 压力驱动流所占比例迅速减小, 吸氢速率快速下降。在“缓慢驱零”阶段(50 s后), 由于床层温度在反应热的作用下会明显升高, 抑制吸氢过程; 氢气向床层内部扩散的路径变长、阻力变大, 也使吸氢速率下降。当压差产生的氢扩散推动力近似等于氢气由储氢合金表面向内部扩散并形成氢化物的“阻力”时, 吸氢速率相对恒定。

综上, 当初始床层温度相同时, 随着吸氢压力升高, 吸氢总时长延长, 累计吸氢量增大, 吸氢速率略有升高; 当吸氢压力相同时, 随着吸氢温度升高, A罐内吸氢总时长持续缩短, 累计吸氢量和吸氢饱和度不断减小。这与文献<sup>[20]</sup>结论基本一致, 即吸氢压力升高, 累计吸氢量增大; 吸氢温度升高, 累计吸氢量减小。

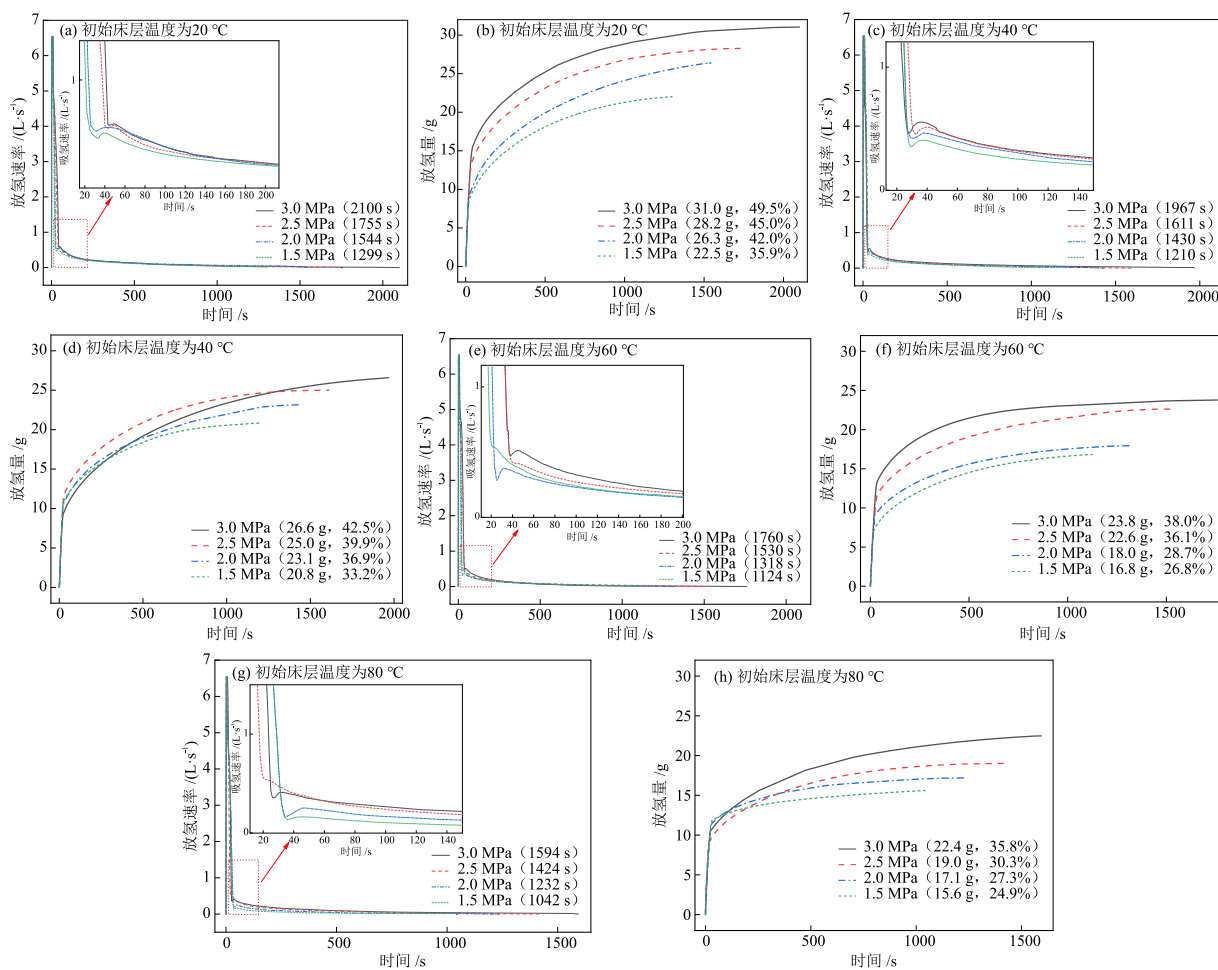


图4(a)、图4(c)、图4(e)和图4(g)图例括号中内容表示吸氢总时长; 图4(b)、图4(d)、图4(f)和图4(h)图例括号中内容分别表示累计吸氢量和吸氢饱和度。

图4 不同工况下A罐的吸氢性能

Fig. 4 Hydrogen absorption performances of tank A under various operating conditions

在该实验中, 由于储氢合金床层芯部换热不充分、储氢合金可能未活化完全等原因, 导致不同工况下的实际最大吸氢量均显著小于理论最大吸氢量, 即吸氢饱和度远小于100%。吸氢压力为3 MPa、初始床层温度为20 °C时, 吸氢饱和度最大(49.5%); 吸氢压力为1.5 MPa, 初始床层温度为80 °C时, 吸氢饱和度最小(24.9%)。虽然A罐在实验中未达到满充状态, 但即便吸氢饱和度只有24.9%, 和同体积、同压力的纯气态储氢罐相比, 储氢量也至少增大了

5.8倍, 充分表明固态储氢体积储氢密度高。与高压气态储氢相比, 固态储氢安全性好。这两点对于便携式应用和大规模固定式应用非常重要。

## 2.2 A罐放氢性能分析

吸氢实验结束后, 将A罐静置于恒温水浴中一段时间, 确保储氢罐及其中的储氢合金床层恢复到吸氢初始时的温度, 随后进行放氢实验。调整储氢罐内放氢压力等于吸氢时设定的压力, 出口压力为大气压, 结果见图5。

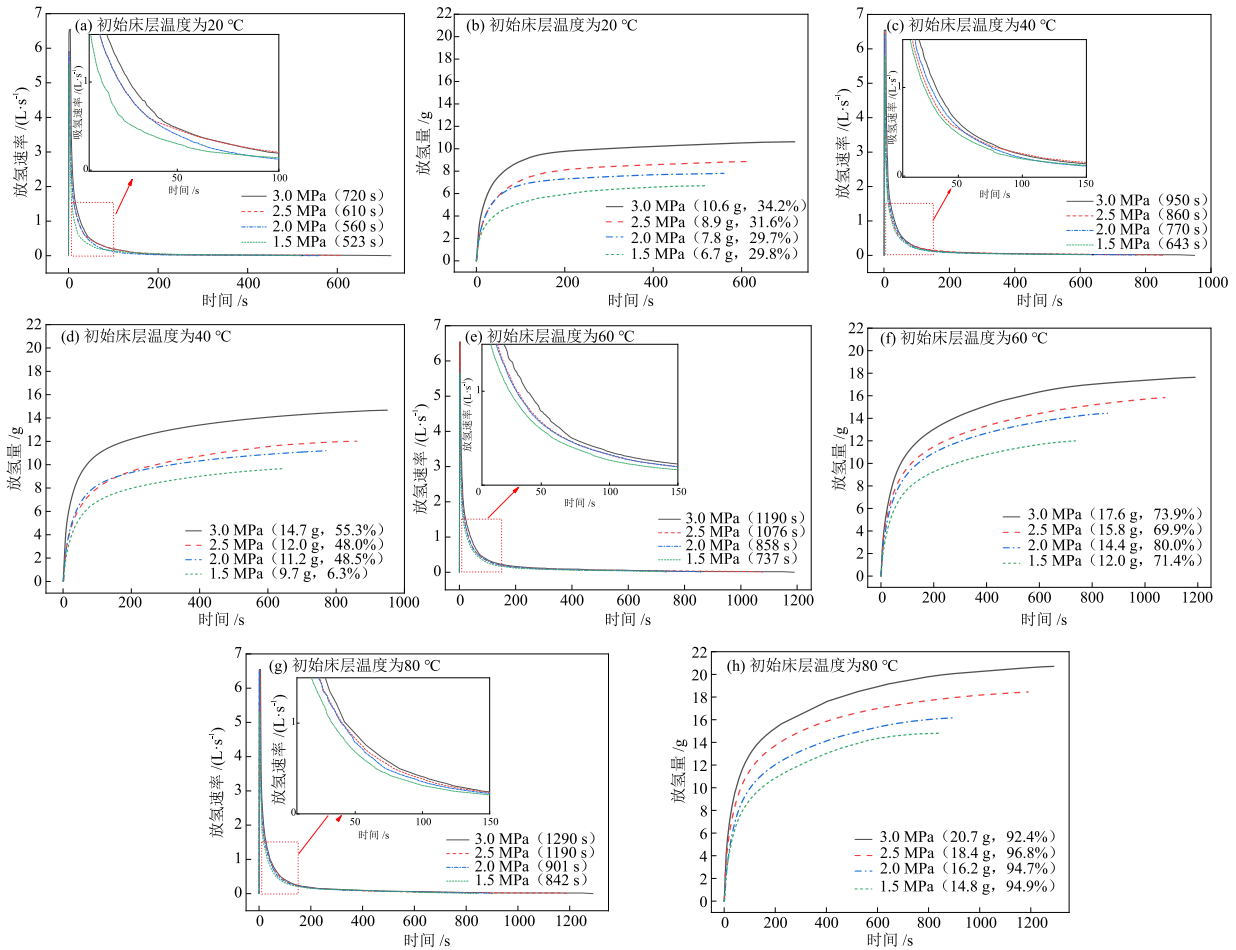


图5(a)、图5(c)、图5(e)和图5(g)图例括号中内容表示放氢总时长;图5(b)、图5(d)、图5(f)和图5(h)图例括号中内容分别表示累计放氢量和可逆放氢率。

图5 各工况下A罐的放氢性能

Fig. 5 Hydrogen desorption performances of tank A under various operating conditions

由图5可知,在各工况下,放氢速率变化趋势相同,均为先快速上升,然后迅速下降,随后较长时间保持相对稳定的速率放氢,呈现“初始陡升-短时陡降-缓慢趋零”的3阶段特征;在各工况下,累计放氢量随时间变化趋势相同,均为先快速增大,随后在较长时间内缓慢增大,呈现“初始陡升-缓慢爬升”的两阶段特征。对于放氢速率,“初始陡升”和“短时陡降”阶段其快速上升和下降的原因在于压差驱动流量占比高、持续时间短。打开放氢阀门后0~20 s内,罐内自由空间的带压氢气快速经由放氢管道泄放到大气环境中,罐内压力迅速降低;放氢20 s后,罐内压力约等于周围环境压力,放氢速率迅速过渡到脱氢反应控速阶段。

综上,初始床层温度相同时,随着放氢压力升高,放氢总时长延长,累计放氢量增大,放氢速率略有升高;放氢压力相同时,随着放氢温度升高,A罐放氢总时长持续延长,累计放氢量和可逆放氢率均持续增大。在该实验中,由于储氢合金床层芯部换

热不充分,导致不同工况下的可逆放氢率未达到100%。初始床层温度为80 °C时,在1.5~3.0 MPa放氢压力范围内,可逆放氢率均能达到90%以上;当初始床层温度为20 °C时,不同放氢压力下的可逆放氢率均下降至35%以下。这表明床层温度对可逆放氢率影响较大。从实际应用角度讲,可逆放氢率比实际最大吸氢量更重要,若在一定压力范围内,可逆放氢率对温度比较敏感,应设法改善换热条件,保证尽可能高的可逆放氢率。

### 2.3 B罐的吸氢、放氢性能分析

B罐罐体总长度1263 mm,罐体内半径60.5 mm,壁厚6 mm,中间设有一根内径8 mm、侧壁多孔的氢管以便氢气进出。B罐在初始床层温度为40 °C下,吸氢压力分别为2.0 MPa和2.5 MPa时进行吸氢实验,随后再进行放氢实验,放氢时罐内初始压力等于吸氢压力,出口压力为大气压,结果见图6。

由图6(a)可知,在吸氢初始阶段,氢气在大压差(> 2.0 MPa)下流动,对应“短时陡升”阶段;约到

140 s时,B罐中自由空间被氢气充满,B罐中压力由抽完真空后的-0.1 MPa迅速增大到设定的吸氢压力,与减压阀出口压力持平,管路中氢气流速显著下降,吸氢速率也快速下降,对应“短时陡降”阶段,随后过渡到稳定的吸氢反应过程。由图6(b)可知,累计吸氢量也呈现“短时陡升-缓慢爬升”的两阶段特征。

由图6(c)可知,在放氢时,B罐初始阶段气体流

速同样很大,罐内自由空间中的氢气在大于2.0 MPa的压差下快速从罐内流出,同时罐内压力迅速降低。随着放氢过程持续,罐内压力逐渐趋于环境压力。同吸氢过程的规律类似,当罐内外放氢压差显著减小后,储氢罐进入平稳放氢阶段直至放氢结束。累计放氢量也呈现“短时陡升-缓慢爬升”的两阶段特征(图6(d)),再次印证了放氢压力越大、累计放氢量和可逆放氢率也越大的基本规律。

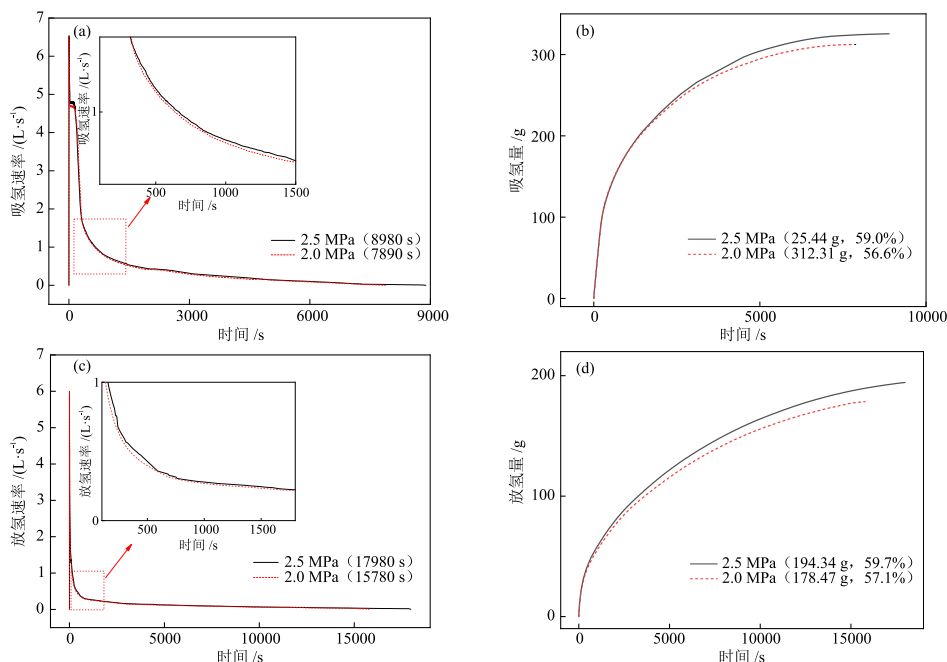


图6(a)、图6(c)图例括号中内容表示吸氢、放氢总时长;图6(b)图例括号中内容分别表示累计吸氢量和吸氢饱和度;图6(d)图例括号中内容分别表示累计放氢量和可逆放氢率。

图6 40 °C时不同压力下B罐的吸氢(a)、(b)、放氢(c)、(d)性能

Fig. 6 Hydrogen absorption ((a), (b)) and desorption ((c), (d)) performances of tank B under different pressures at 40 °C

综上,吸放氢速率均随着压力升高而略有增大,在更大吸放氢压力下储氢罐具有更长的吸放氢总时长;在40 °C时,B罐吸氢饱和度在50%以上,高于A罐在各工况下的吸氢饱和度;B罐放氢时的可逆放氢率也比A罐在40 °C条件下的可逆放氢率高。由此可见,适当增大长径比,可提高储氢罐综合换热效果,从而改善其吸放氢性能。

### 3 结论

利用自主设计的固态储放氢性能测试装置,对两个具有不同长径比的储氢罐的吸放氢性能进行了实验测试与分析,得到如下主要结论。

(1)在不同吸放氢工况下,同一种储氢罐吸放氢速率变化趋势相同,均呈现“初始陡升-短时陡降-缓慢趋零”的3阶段特征;不同吸放氢工况下的累计吸放氢量变化趋势也相同,呈现“初始陡升-缓慢爬

升”的两阶段特征。在一次吸氢或放氢过程中,初始陡升阶段时长在吸氢或放氢总时长中的占比不超过2%,该阶段吸氢速率最高为6.545 L/s。

(2)对于吸氢过程,当初始床层温度相同时,随着吸氢压力升高,吸氢总时长延长,累计吸氢量和吸氢饱和度增大,吸氢速率略有升高;当吸氢压力相同时,随着吸氢温度升高,吸氢总时长缩短,累计吸氢量和吸氢饱和度减小。对于放氢过程,当初始床层温度相同时,随着罐内初始放氢压力升高,放氢总时长延长,累计放氢量和可逆放氢率增大,放氢速率略有升高;在罐内初始压力相同时,随着放氢温度升高,放氢总时长延长,累计放氢量和可逆放氢率增大。

(3)当储氢罐长径比增大时,吸放氢速率和累计吸放氢量随时间的变化趋势相同,先急剧增大和减小,然后平缓持续,但各阶段持续时间更长。初

始床层温度为 40 °C 时, B 罐吸氢饱和度超过 50%, 比 A 罐在各种工况下的吸氢饱和度都高, 且 B 罐可逆放氢率也更大, 可见适当增大储氢罐长径比, 可改善吸放氢性能。

### 参考文献

- [1] 张晓飞, 蒋利军, 叶建华, 等. 固态储氢技术的研究进展 [J]. 太阳能学报, 2022, 43(6): 345-354.  
ZHANG X F, JIANG L J, YE J H, et al. Research progress of solid-state hydrogen storage technology [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(6): 345-354.
- [2] 李海波. 固态储氢技术现状与发展趋势分析 [J]. 现代化工, 2024, 44(4): 13-18.  
LI H B. Development trend and present status of solid state hydrogen storage technology [J]. Modern Chemical Industry, 2024, 44(4): 13-18.
- [3] YAN H G, ZHANG W D, KANG J D, et al. The necessity and feasibility of hydrogen storage for large-scale, long-term energy storage in the new power system in China [J]. Energies, 2023, 16(13): 4837.
- [4] RUSMAN N A A, DAHARI M. A review on the current progress of metal hydrides material for solid-state hydrogen storage applications [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(28): 12108-12126.
- [5] PISTIDDA C. Solid-state hydrogen storage for a decarbonized society [J]. Hydrogen, 2021, 2(4): 428-443.
- [6] XU Y H, ZHOU Y, LI Y T, et al. Research progress and application prospects of solid-state hydrogen storage technology [J]. Molecules, 2024, 29(8): 1767.
- [7] LEE S Y, LEE J H, KIM Y H, et al. Recent progress using solid-state materials for hydrogen storage: A short review [J]. Processes, 2022, 10(2): 304.
- [8] KHAFIDZ N A Z, YAAKOB Z, LIM K L, et al. The kinetics of lightweight solid-state hydrogen storage materials: A review [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(30): 13131-13151.
- [9] KUMAR A, MUTHUKUMAR P, SHARMA P, et al. Absorption based solid state hydrogen storage system: A review [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 52: 102204.
- [10] DARZI A A R, AFROUZI H H, ALIZIZADEH E, et al. Numerical simulation of heat and mass transfer during absorption of hydrogen in metal hydride tank [J]. Heat Transfer—Asian Research, 2017, 46(1): 75-90.
- [11] JEMNI A, NASRALLAH S B, LAMLOUMI J. Experimental and theoretical study of a metal-hydrogen reactor [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1999, 24(7): 631-644.
- [12] SINGH A, MAIYA M P, MURTHY S S. Experiments on solid state hydrogen storage device with a finned tube heat exchanger [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(22): 15226-15235.
- [13] SINGH A, MAIYA M P, MURTHY S S. Performance of a solid state hydrogen storage device with finned tube heat exchanger [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(43): 26855-26871.
- [14] MELLOULI S, ASKRI F, DHAOU H, et al. A novel design of a heat exchanger for a metal-hydrogen reactor [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(15): 3501-3507.
- [15] MELLOULI S, ASKRI F, DHAOU H, et al. Numerical simulation of heat and mass transfer in metal hydride hydrogen storage tanks for fuel cell vehicles [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(4): 1693-1705.
- [16] CHANG H, TAO Y B, YE H. Numerical study on hydrogen and thermal storage performance of a sandwich reaction bed filled with metal hydride and thermochemical material [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(52): 20006-20019.
- [17] ARDAHAIE S S, HOSSEINI M J, EISAPOUR M, et al. A novel porous metal hydride tank for hydrogen energy storage and consumption assisted by PCM jackets and spiral tubes [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 311: 127674.
- [18] 张贺, 林繁鑫, 刘勇, 等. Ti-Mn 系储氢合金的研究进展 [J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(6): 1873-1883.  
ZHANG H, LIN F X, LIU Y, et al. Research progress of Ti-Mn hydrogen storage alloys [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2024, 52(6): 1873-1883.
- [19] REILLY J J, WISWALL R H. Formation and properties of iron titanium hydride [J]. Inorganic Chemistry, 1974, 13(1): 218-222.
- [20] ELKHATIB R, LOUAHLIA H. Metal hydride cylindrical tank for energy hydrogen storage: Experimental and computational modeling investigations [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 230: 120756.