DOI: 10.3901/JME.2021.06.052

车载深冷高压储供氢过程预测和影响因素研究*

刘雨农¹ 徐展¹ 倪中华¹ 魏蔚² 严岩¹

(1. 东南大学机械工程学院 南京 211189;

2. 张家港氢云新能源研究院有限公司 张家港 215600)

摘要: 针对应用深冷高压储氢技术的车载系统,为补充现有研究中缺乏的描述系统实时运行状态的方法,提出利用储氢密度确定工况的预测模型。基于丰田 Mirai 氢燃料电池车型建立动力学部分的模型。电堆功率和氢气流量的相对误差分别不超过 7%和 1.3%。基于 Refprop 物性软件建立热力学部分的模型。储氢密度的相对误差不超过 1%,从而验证储供氢过程预测模型的精度。此外,还研究储氢容器的初始温度和压力工况对汽车续航里程和容器休眠期的影响。结果表明,35 MPa 下,容器初温由 40 K 变为 70 K,车辆的续航里程减少约 18%。同时,增加容器初压可以延长续航里程,但在 35 MPa 左右的高压时,增压的效果很不明显。而初温 70 K、初压 5~35 MPa 的常见工况范围内,行驶过程中容器压力变化很大,易发生疲劳破坏。为达到固定的休眠期,对漏热量更大的储罐,加注后需实现更低的初温来满足使用需求。

关键词: 密度计量; 储氢; 低温压力容器; 燃料电池汽车; 预测模型;

中图分类号: U469

Study on Prediction and Influencing Factors of Cryogenic Compressed Hydrogen Storage and Supply Process

LIU Yunong¹ XU Zhan¹ NI Zhonghua¹ WEI Wei² YAN Yan¹

(1. Southeast University, School of Mechanical Engineering, Nanjing 211189;

2. Hydrogen Cloud New Energy Research Institute Co., Ltd., Zhangjiagang 215600)

Abstract: For on-board system using cryogenic compressed hydrogen storage technology, a prediction model using hydrogen storage density to determine working conditions is proposed to supplement the lack of existing research methods to describe the consecutive operating status of the system. Establish the kinetics section of the model based on the parameter of Toyota Mirai hydrogen fuel cell vehicle. In this part, the relative error of stack power and hydrogen flow rate are less than 7% and 1.3%, respectively. Establish the thermodynamic section of the model based on the Refprop physical property software. In this part, the relative error of the hydrogen density of the model is less than 1%, thus verifying the accuracy of the prediction model for the hydrogen storage and supply process. In addition, explore the effects of the initial temperature and pressure conditions of the hydrogen storage vessel on the driving mileage of the vehicle and the dormancy of the vessel. The results show that under 35 MPa, the initial temperature of the vessel changes from 40 K to 70 K, and the driving mileage of the vehicle is reduced by about 18%. Meanwhile, increasing the initial pressure of the vessel can extend the driving mileage, but at a high pressure of about 35 MPa, the effect of pressurization is not obvious. In the common working condition range of initial temperature of 70 K and initial pressure of 5-35 MPa, the pressure of the vessel changes greatly during driving and fatigue damage is likely to occur. Finally, in order to achieve a fixed dormancy, for storage vessel with greater heat leakage, a lower initial temperature must be achieved after filling to meet the use requirements.

Key words: hydrogen storage; cryogenic pressure vessel; fuel cell vehicle; density measurement; predictive model

* 国家自然科学基金(51905093)和江苏省基础研究计划(自然科学基金)(BK20180392)资助项目。20200330 收到初稿, 20201130 收到修改稿

0 前言

氢燃料电池汽车以其能量转化率高、燃料经济性好、零排放等优点，已成为新能源产业中最为活跃的研究领域之一^[1]。然而，与传统电池燃料不同，常态下的氢气具有密度低、易燃易爆、极易扩散等不利于储存运输和车载应用的特性。车载储氢技术一直是困扰氢燃料电池汽车发展的技术难题^[2]。储氢方面，现有技术种类很多，包括高压储氢、低温液态储氢、吸附储氢等^[3]，但大多数都无法达到美国能源部(Department of energy, DOE)制定的成熟技术目标^[4]。

Lawrence Livermore 国家实验室将液氢容器的内层材料换为耐高压材料，研发了能够进行 20~100 K, 10~50 MPa 存储的深冷高压储氢技术(又称低温高压复合储氢)，结合了液态储氢储存密度高和气态储氢休眠期长的优点，是一种很有前景的新型物理储氢技术^[5]。

氢气在使用时仍然存在运输保存条件苛刻、储存风险高等技术难题，氢气密度、气体纯度、气相空间的计量对于安全储运就显得尤为重要。储氢密度的计量方法主要由氢气状态决定。液态储氢通常使用液位计测算罐内剩余储氢状态，再利用经验公式计算减小

误差。气态储氢通常使用压力计获取容器内压力来确定氢气密度，进而得到储氢质量。而对于深冷高压储氢技术，由于起始状态罐内工况条件苛刻，简便、合适的密度计量手段及运行状态的分析较少。

对于深冷高压储氢技术的储罐状态分析，国内研究处于起步阶段。国外研究集中于提升储氢质量密度、体积密度和储罐耐用性、经济性的探究。本文依据热力学原理建立了深冷高压储氢的密度预测模型，并且验证了模型动力学与热力学部分的计算精度。通过改变容器内热力学工况，具体分析了车辆的行驶及停放过程中续驶里程、休眠期等典型参数的变化趋势，为储氢系统参数设计标准和储氢罐应用标准的完善提供依据。

1 储氢系统功能原理

1.1 储氢系统工况计量原理

深冷高压氢因其存储的高压、低温环境，只能采用间接测量的方式确定其储氢质量。本文中计量储氢系统工况的核心为储氢密度，原理如图 1 所示。参量输入为储氢容器中氢气的初始温度和初始压力。经过 Matlab 数值模型的计算，输出的目标结果为车载系统容器内任意时刻的氢气密度和储氢质量。

图 1 储氢系统工况计量原理图

储氢系统建模工作包括两部分：汽车行驶状态的动力学模型和储氢工况的热力学模型。

2 动力学建模

对于氢燃料电池汽车，其行驶状态是耗氢量的重要影响因素。为了表征汽车在任意状态的功率变化情况，需要进行车辆动力学建模。其流程包括：得到整车能量传递效率和燃料电池发电效率，对车体力学分析计算驱动功率，最后根据燃料电池反应的产能情况得到氢气流量。

2.1 能量转移、转化效率

参照丰田公司的氢能源车型丰田 Mirai 的相关

参数，进行空气阻力、摩擦阻力、重力坡向分力、惯性力的计算。而本模型中的能量转移、转化效率可分为两部分：氢气化学能转化为电能的发电效率 η_1 和电能转移、转化为驱动车辆的机械能供电效率 η_2 。整车和电池效率的参数取值如表 1、2 所示^[6]。

表 1 燃料电池汽车(丰田 Mirai)参数表

整车参数	数值
整车整备质量 m_v/kg	1 850
迎风面积 A/m^2	2.7
风阻系数 C_d	0.32
轮胎滚阻系数 f	0.012
理论模型速度 $v/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	60
理论模型加速度 $a/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	0
路面坡度 $\theta/(\text{°})$	0

表 2 燃料电池效率参数表

燃料电池效率参数	数值
燃料电池系统发电效率 η_1	0.5
DC/DC 转换器效率 η_3	0.96
蓄电池充/放电效率 η_4	0.95
电机及其驱动系统效率 η_5	0.85
传动效率 η_6	0.9

据表整合效率参数, 供电效率 η_2 计算如式(1)所示

$$\eta_2 = \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5 \cdot \eta_6 \approx 0.70 \quad (1)$$

由此, 本模型中燃料电池发电效率 $\eta_1=0.5$, 供电效率 $\eta_2=0.7$ 。

2.2 力学分析

通过达朗贝尔原理分析汽车的受力。发动机牵引力 F 大小可表示为空气阻力 F_A 、车轮阻力 F_w 、爬坡阻力 F_c 等各种阻力 F_R 和惯性力 F_I 之和。为简化状态分析, 速度恒定, 坡度与加速度都取值为零。

汽车消耗的总功为微小的位移与瞬时牵引力之积, 如式(2)所示

$$W = \sum_{i=1}^t F_i \cdot S_i \quad (2)$$

式中, i 为任意时刻, 以秒计; 对行驶时长进行微分, 极小的一段时间 dt 内, 牵引力视作恒定不变, 汽车行驶消耗的瞬时功率如式(3)所示

$$P_v = \frac{dW}{dt} = F \cdot v \quad (3)$$

式中, P_v 为汽车任意时刻的瞬时功率。

2.3 氢气流量

确定汽车功率后需要分析燃料电池的反应机理根据效率取值确定氢气流量。压力 1.01×10^5 Pa 下, 室温 25 °C 时, H_2 、 O_2 、 H_2O 下的热力学数据如表 3 所示^[7], 氢氧燃料电池总反应为

式中, 对于稳态工作时, 压力与温度基本不变的燃料电池反应环境, ΔH 为焓变。

根据热力学第一定律, 电池反应的热效应可表示如式(4)所示

$$\Delta H = W_{FC} + Q_{FC} = \Delta G + T \Delta S \quad (4)$$

式中, ΔG 为吉布斯自由焓差, ΔS 为熵差, W_{FC} 为可对外做功的能量, Q_{FC} 为耗散的热能。

表 3 H_2 、 O_2 、 H_2O 的热力学数据

	$\Delta_f H_m^0$ /(kJ/mol)	$\Delta_f G_m^0$ /(kJ/mol)	S_m^0 /(J/(mol · K))
H_2 (气态)	0	0	130.59
O_2 (气态)	0	0	205.03
H_2O (液态)	-285.84	-237.19	69.94

燃料电池反应中, 电池产生的电能与反应热的比值定义为理论热效率^[8]。受活化极化、欧姆极化和浓度极化的影响, 其实际热效率低于理论热效率, 本模型取 0.5, 即前文所述的发电效率 η_1 。

由于氢气的爆炸极限为 4%~74.2%, 为保证电池反应的安全, 氢气必须过量。过量系数取 $K=1.5$ 。

汽车消耗功率 P_v 与燃料电池堆组产生的功率 P_{FC} 的关系为

$$P_{FC} = P_v / \eta_2 \quad (5)$$

综上, 汽车行驶消耗的氢气流量(摩尔流量)与瞬时功率存在如下关系

$$q_{mol} = \frac{P_v \cdot K}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \Delta H} \quad (6)$$

设氢气流量(质量流量)为 q_{H_2} (g/s)。为简化计算, 将摩尔流量转化为质量流量, 换算如式(7)所示

$$q_{H_2} = q_{mol} \cdot M_{H_2} \quad (7)$$

由此, 可根据汽车任意时刻的功率来得到氢气流量, 进而得到剩余储氢质量。

3 热力学建模

以储氢容积 151 L 的深冷高压储氢Ⅲ型瓶为例, 将储氢容器作为开口系, 假设该热力系满足以下条件: ① 只有物质流出而无进入; ② 忽略氢气的宏观动能和位能; ③ 不存在轴功。简化的开口系热力学方程可得

$$\delta Q = h_2 dm_2 + dU \quad (8)$$

式中, $h_2 dm_2$ 为流出氢气带出开口系的热力学能, dU 为系统热力学能的改变量。

由于本文研究重点是储氢初始状况对车辆行驶里程的影响, 未深入探究供氢泄放时传质传热的影响。而基于工程实际判断, 简化后的模型, 在行驶里程的预测上, 依然具有参考意义。热量交换主要为容器与外界环境的热交换, 容器设计热流量为 1~3 W, 受真空质量和环境温度的影响, 实际热流量为 4~5 W^[9]。

结合上述分析, 模型供氢过程中, 容器与环境交换的热流量取为 5 W。

3.1 热力过程的连续描述

本模型选用基于范德瓦尔斯方程的 refpropm 函数确定气体的热力学状态。该过程通过 Matlab 调用 Refprop 软件实现。对于密度计量,初始输入为容器的压力和氢气的温度,热力过程因相邻工况间温度变化极小且整个反应过程均匀而可看作是准静态过程,容器温度与氢气温度相等。

3.2 工况计算

(1) 输入容器初始温度 T_0 、初始压力 p_0 , 用 refpropm 函数得到初始密度 D_0 , 初始等压热容 C_{p0} 。

(2) 结合容器体积 V 得到初始储氢质量 m_0

$$m_0 = D_0 \cdot V \quad (9)$$

(3) 根据动力学模型的耗氢量 q_{H_2} (Δm_i) 得到任意时刻质量 m_i 和密度 D_i

$$m_i = m_{i-1} - \Delta m_i \quad (10)$$

$$D_i = m_i / V \quad (11)$$

(4) 假设环境传热流量为常值 Q , 由热量平衡方程得到任意时刻的温差 ΔT_i

$$\Delta T_i = Q / (C_{pi} \cdot M_{i-1}) \quad (11)$$

(5) 得到容器任意时刻的温度 T_i

$$T_i = T_{i-1} + \Delta T_i \quad (12)$$

(6) 用 refpropm 函数得到任意时刻的容器压力 p_i 和氢气热容 C_{pi}

$$p_i = \text{refpropm}(T_i, D_i) \quad (13)$$

$$C_{pi} = \text{refpropm}(T_i, D_i) \quad (14)$$

(7) 循环上述流程(3)~(6), 得到任意时刻($i=1, 2, \dots$)的热力学工况。如图 2 所示, 通过离散迭代的方式, 可分析全过程的热力学状态。

图 2 热力学模型的建立

4 模型验证

储氢系统模型的验证分两部分: 动力学模型的验证和热力学模型的验证, 均通过模型计算的理论与技术试验值比较的方式进行。

4.1 动力学模型验证

使用电堆功率衡量整车建模和受力分析; 使用单位功率氢气流量分析燃料电池的参数选取和耗氢量计算, 其理论值计算如下, 单位功率氢气流量

$$q_p = \frac{q_{mol} \cdot M_{H_2}}{P_{FC}} \frac{K \cdot M_{H_2}}{\Delta H \cdot \eta_1} \approx 0.021 \text{ 10 g/s} \quad (15)$$

由此可知, 单位功率氢气流量与汽车配置、行驶状态无关。其主要受到电堆的燃料种类及发电环节效率的影响, 因此可作为供氢技术的通用标准来验证燃料电池选型计算的准确性。

为验证模型的动力学部分, 本文选取了几种车型进行燃料电池堆组功率验证和单位功率氢气流量验证^[9], 如图 3a、3b 所示。

(a) 不同车型燃料电池堆组功率验证

(b) 不同车型单位功率氢气流量验证

图 3 不同车型燃料电池堆组功率和单位功率氢气流量验证

如图 3a 所示, 燃料电池堆组功率的理论值与试验值拟合较好, 最大相对误差不超过 7%。据此, 汽车运动状态分析可靠。如图 3b 所示, 单位功率氢气流量的模型计算值与理论值相对误差不超过 1.3%。据此, 燃料电池选型合理。

综合电堆功率和耗氢量分析的结果, 模型动力学部分的建模得到验证。

4.2 热力学模型验证

本文选用储氢密度作为罐内热力学状态预测的检验标准。参考 PETITPAS 等^[9]进行的深冷高压储氢的加注试验, 如图 4 所示。

图 4 模型储氢密度验证

图 4 中, 12 个加注工况(60~75 K, 34.5 MPa)的试验值均为劳伦斯-利弗莫尔实验室进行的 20 K 到室温的加注试验的部分数据, 理论值为模型在相同压力、温度下使用 Refprop 物性软件的计算结果。模型的理论密度与文献的试验密度相对误差值很小, 不超过 1%。由此, 模型使用 refpropm 函数进行的温压工况计算方法可行, 其热力学部分得到验证。

5 供氢工况分析

5.1 初始工况设定

对于深冷高压储氢容器, 其氢源来自压力和温度稳定的液氢泵(0.3 MPa, 24.6 K)。在加注完成后, 储氢容器就由加注末态进入到储氢或耗氢的初态, 为设计接近实际的初始工况, 本模型以容器加注末态的压力和温度为参考, 设计储氢、耗氢初态的温度和压力。初态数据参考自 PETITPAS 等进行的深冷高压氢加注试验^[8]。该试验中, 加注后容器温度集中在 59~75 K; 容器压力接近 34 MPa(储氢性能的评级压力制定为 34.5 MPa)。

由此, 热力学初态工况设计如下, 初始温度:

40~70 K, 试验点间隔 5 K; 初始压力: 5~35 MPa, 试验点间隔 5 MPa。

5.2 容器初温对供氢工况的影响

设定汽车在平直路面以 60 km/h 匀速行驶, 路面无风, 容器初始压力为评级标准的 35 MPa。图 5 表示压力恒定时, 不同初温会导致储氢质量的不同, 进而影响汽车的续航里程。在容器初温 40 K 下能行驶 291 km 的汽车, 70 K 下仅能行驶 240 km, 续航里程减少 18%。因此, 为获得更高的续航里程, 加氢站加注过程中应力图实现更低的加注温度, 以提升加注的氢气质量。

图 5 初压 35 MPa, 不同初温下汽车续航里程的变化曲线

5.3 容器初压对供氢工况的影响

汽车的行驶状态同上, 储罐初温设定为 70 K。如图 6 所示, 模型的计算结果可在给定容器初始压力和温度的情况下确定储氢质量, 并由此预测在当前行驶工况下汽车剩余的可续航里程。这一特点可实现里程表的续航余量提醒功能。

图 6 初温 70 K, 不同初压下汽车续航里程的变化曲线

此外, 对比 70 K 下, 容器初压为 5 MPa 和 35 MPa 时的情况。初压各增加 5 MPa 时, 续驶里程分别增加 89%和 6%。由图 5a 也可看出曲线明显趋缓。在讨论的压力范围内, 为提高续航里程, 可增加容器的初压。但在接近 35 MPa 的高压时, 增加

初压对于提升储氢质量的效果很有限。

不同填充量下容器压力全程的变化情况如图 7 所示。观察曲线可知, 初压越高的储罐压力变化越不均匀。以 35 MPa 为例, 在行驶了 120 km 时(50% 续航里程), 容器压力就已下降到 9.6 MPa, 为初压的 27% 左右。对于需要多次填充的储罐, 剧烈的压力变化易使得容器材料产生疲劳破坏, 这表明在容器的设计与检修中, 应重视压力测试中容器疲劳特性的检查, 尤其是满填充到半填充段。

图 7 初温 70 K, 四种不同初压下容器压力随续航里程的变化曲线

6 储氢工况分析

6.1 压力对休眠期的影响

休眠期是氢气从加注完成到因超压而需要泄放的无损储存时间。为实现稳定储氢, 需要分析热力学状态对休眠期的影响。模拟结果可为设计分析作参考, 储罐与环境交换的热流量参照文献取理想条件下的典型常值 3 W^[10, 14]。

图 8 反映了恒定热流量下, 容器初压对于储氢稳定性的影响。可知, 对于特定初温的容器, 初压越高, 其储氢休眠期越短。在实际应用中, 要在初温 40 K 的工况下实现 14 天以上的储氢目标, 容器注氢后的初压不应超过 20 MPa, 如虚线所示。

图 8 热流量为 3 W 时休眠期随容器初压的变化曲线

6.2 热流量对休眠期的影响

为满足使用需求, 需要长期储存定量的氢气。如图 9、图 10 所示, 储氢质量为 10 kg^[13] 时休眠期随容器初温和热流量变化的曲线。

图 9 储氢质量 10 kg 时休眠期随容器初温变化的曲线

图 10 储氢质量 10 kg 时休眠期随热流量变化的曲线

两图表示储存定量氢气时, 休眠期会随容器初温的上升而缩短, 而降低储罐的热流量可有效延长休眠期。参照美国能源部的技术标准, 理想的储氢手段应使休眠期达到 14 天以上^[12]。

此分析的意义在于, 可对给定工况下储罐的休眠期做出预测, 以满足生产中的实际需求。例如, 需要设计可储存 10 kg 氢气达 14 天的容器, 所生产的储罐的热流量标定值为 3 W 时, 合格的容器加注后初温应在 56 K 及以下。若受到工艺限制, 储罐热流量为 5 W 时, 容器初温需低于 40 K。实际设计和选用对应标准的储罐时应根据其降温和隔热成本做出选择。

6.3 临界休眠期

深冷高压储氢容器中, 当氢气因达到许用压力而泄放时, 容器温度也会上升, 直到与外界环境达到热平衡。若此时压力为容器的许用压力, 则恰好无需放出氢气, 休眠期极长, 称为临界的休眠工况(下称临界工况)。类似地, 在本模型中, 有如下定

义,有限休眠:容器温度在上升至室温前容器压力就已达许用压力而需要泄放氢气的状态,休眠期较短。完全休眠:容器温度在上升至室温后,与环境的热交换量下降为零,故容器压力尚未达到许用压力就已基本恒定。此时的容器可等效为室温下的高压气态储氢瓶。理论上,该工况下储氢时间将明显延长。

储氢时罐内氢气质量不变,进一步改变容器初温得到一系列对应的临界工况点。可得,许用压力为 43.7 MPa 的标准值(许用压力值一般为储罐设计的工作压力值的 1.25 倍^[11])时,临界工况的储氢质量可算得为 4.18 kg,约为 40 K 下容器满填充量的 1/3。据此,实际应用中本模型储罐(容积 151 L,额定工作压力 35 MPa)的填充率在不超过 34%的时候可长时间储氢。

图 11 为实现临界工况的容器压力随容器初温的变化曲线。应用中,为实现长期储氢,在设计储氢系统的初始温度和压力时,可选取完全休眠区的数据点简化分析。

图 11 容器不同初温下临界工况点的初压变化曲线

7 结论

本文以车载深冷高压储供氢系统为对象,通过热力学原理对该工况下储氢的密度计量建立了计算模型并验证了其准确性,并通过热力学工况的研究得到了以下结论。

(1) 对所研究的初温 40~70 K 范围内,在技术可行的情况下为获得更高的续航里程,加氢站加注过程中应提供更低的加注温度以提升单次加注的氢气质量。

(2) 对所研究的初压 5~35 MPa 范围内,行驶中容器压力变化很大,容易发生疲劳破坏。在容器的设计与检修时,应重视容器疲劳性的检查。同时,

增加存储初压可以提高续航里程,但在接近 35 MPa 的高压时,增加初压对提升储氢质量的作用很有限,不应盲目增压。

(3) 在设计深冷高压储氢罐时,为实现 14 天以上休眠期的目标,对漏热量不同的储罐,加注后初始温度标准是不同的。漏热量大的储罐,加注后初温要求更低。实际设计和选用对应标准的储罐时应根据其降温和隔热成本做出选择。

参 考 文 献

- [1] 王卫兵. 氢能的开发现状及应用前景[J]. 运城学院学报, 2006, 24(2): 47-48.
WANG Weibing. Development status and application prospect of hydrogen energy[J]. Journal of Yuncheng University, 2006, 24(2): 47-48
- [2] 赵永志, 花争立, 欧可升, 等. 车载低温高压复合储氢技术研究现状与挑战[J]. 太阳能学报, 2013, 34(7): 1300-1306.
ZHAO Yongzhi, HUA Zhengli, OU Kesheng, et al. Research status and challenges of cryogenic compressed hydrogen storage technology for vehicle[J]. ActaEnergiae Solaris Sinica, 2013, 34(7): 1300-1306.
- [3] 张震, 施晓丽, 刘玉涛. 液氢铁路槽车充装计量误差对比分析研究[C]//中国制冷学会, 第十一届全国低温工程大会, 2013, 遵义: 397-400.
ZHANG Zhen, SHI Xiaoli, LIU Yutao. Comparative analysis of measurement errors in liquid hydrogen railway tank car filling[C]//Chinese Association of Refrigeration, Proceedings of the 11th National Low Temperature Engineering Conference August 22, 2013, Zunyi: Guizhou Province: 397-400.
- [4] AHLUWALIA R K, HUA T Q, PENG J K. On-board and off-board performance of hydrogen storage options for light-duty vehicles[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(3): 2891-2910.
- [5] ACEVES S M. Compact(L)H₂ storage with extended dormancy in cryogenic pressure vessels[R]. DOE Hydrogen Program Annual Review, 2009.
- [6] 殷婷婷, 黄晨东, 程伟, 等. 燃料电池汽车动力系统运行效率研究[J]. 上海汽车, 2012(8): 2-5.
YIN Tingting, HUANG Chendong, CHENG Wei, et al. Research on operating efficiency of fuel cell vehicle power system[J]. Shanghai Automotive, 2012(8): 2-5.
- [7] 阎耀保, 罗九阳. 氢能源汽车高压供氢系统特性分析[D]. 上海: 同济大学, 2009.

- YIN Yaobao, LUO Jiuyang. Characteristic analysis of high-voltage hydrogen supply system for hydrogen energy vehicles[D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [8] 陈锦芳, 吴伟, 欧向波. 天然气重整制氢用于氢燃料电池汽车的热效率[J]. 煤气与热力, 2016, 49(5): B09-B04.
- CHEN Jinfang, WU Wei, OU Xiangbo. Natural gas reforming hydrogen production for hydrogen fuel cell vehicles thermal efficiency[J]. Gas and Heat, 2016, 49(5): B09- B04.
- [9] PETITPAS G, JULIO M B, FRANCISCO E L, et al. Rapid high density cryogenic pressure vessel filling to 345 bar with a liquid hydrogen pump[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(42): 19547-19558.
- [10] 王耀. 2018-2019 年中国汽车动力蓄电池及氢燃料电池产业发展年度报告[R]. 上海: 中国汽车动力电池产业创新联盟, 2019.
- WANG Yao. 2018-2019 China automotive power battery and hydrogen fuel cell industry development annual report[R]. Shanghai: China Automotive Power Battery Industry Innovation Alliance, 2019.
- [11] AHLUWALIA R K, PENG J K, ROH H S, et al. Supercritical cryo-compressed hydrogen storage for fuel cell electric buses[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(22): 10215-10231.
- [12] LUPU D, COLDEAI, MISAN M, et al. Hydrogen storage potential in MIL-101 at 200K[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(25): 12715-12723.
- [13] PETITPAS G, BENARD P, KLEBANOFF L E. A comparative analysis of the cryo-compression and cryo-adsorption hydrogen storage methods[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(20): 10564-10584.
- [14] JULIO M B, PETITPAS G, FRANCISCO E L. The storage performance of automotive cryocompressed hydrogen vessels[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(31): 16841-16851.

作者简介: 刘雨农, 男, 1997 年出生。主要研究方向为氢能源利用及储氢装备制造, 核磁共振技术及应用。

E-mail: 213152744@seu.edu.cn

严岩(通信作者), 男, 1988 年出生, 博士。主要研究方向为液氢、深冷高压氢等低温流体储运和应用技术。

E-mail: 101012319@seu.edu.cn