doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2025.01.007

设计计算

Ⅳ型储氢气瓶塑料内胆材料厚度对渗透性能的影响及渗透参数计算方法研究

杨　超[1,2,3],张来明[1],江一凡[2,3],孙剑锋[4],周忠警[2,3],骆　辉[1,2,3]

(1.中国特种设备检测研究院,北京 100029;2.嘉兴市长三角氢安全研究中心,浙江嘉兴 314200;3.国家市场监督管理总局重点实验室(氢能储运装备安全),浙江嘉兴 314200;4.嘉兴市市场监督管理局 港区分局,浙江嘉兴 314200)

摘　要:为深入地研究聚合物在氢环境下的作用机制,以储氢气瓶用内胆材料PA11为研究对象,采用自主搭建的高温高压氢渗透试验系统,探究材料厚度对氢渗透特性的影响规律。通过开发基于Python的时滞法分析程序,集成标准偏差法实现渗透过程稳态判定与滞后时间计算自动化,有效提升数据处理效率与精度。结果表明,材料厚度的增加引起氢渗透系数与溶解系数下降,而氢扩散系数呈现上升趋势,这归因于成型过程中厚度变化导致的微观结构演变。该研究揭示了聚合物材料厚度与氢渗透行为的关联机制,为高压塑料内胆储氢气瓶的材料选型与结构优化提供了理论依据,对提升氢能存储系统的安全性与可靠性具有重要工程意义。

关键词:储氢气瓶;氢渗透;渗透系数;扩散系数;溶解系数

中图分类号:TH49;TK91;O552.2　　**文献标志码:**A

Study on the effect of polymer liner thickness on hydrogen permeation performance and calculation methods for permeation parameters in type IV hydrogen storage cylinders

YANG Chao[1,2,3],ZHANG Laiming[1],JIANG Yifan[2,3],SUN Jianfeng[4],ZHOU Zhongjing[2,3],LUO Hui[1,2,3]

(1.China Special Equipment Inspection & Research Institute,Beijing 100029,China;2.Yangtze River Delta Hydrogen Safety Research Center,Jiaxing 314200,China;3.Key Laboratory of Safety of Hydrogen Energy Storage and Transportation Equipment,State Administration for Market Regulation,Jiaxing 314200,China;4.Jiaxing Municipal Bureau of Market Regulation Jiaxing Port Sub-bureau,Jiaxing 314200,China)

Abstract: To investigate the mechanism of polymer behavior in hydrogen environments,this study focuses on PA11,the inner liner material for hydrogen storage cylinders.Using a self-developed high-temperature and high-pressure hydrogen permeation testing system,the influence of material thickness on hydrogen permeation characteristics was systematically explored.A Python-based time-lag analysis program was developed to automate steady-state determination and lag time calculation during permeation by integrating the standard deviation method,significantly improving data processing efficiency and accuracy.Results indicate that increasing material thickness leads to a decrease in hydrogen permeability and solubility coefficients,while the diffusion coefficient shows an upward trend.This phenomenon is attributed to microstructural evolution caused by thickness variations during the forming process.The study reveals the correlation between polymer thickness and hydrogen permeation behavior,providing a theoretical basis for material selection and structural optimization of high-pressure polymer-lined hydrogen storage cylinders.These findings hold significant engineering implications for enhancing the safety and reliability of hydrogen energy storage systems.

Key words:hydrogen storage cylinders;hydrogen permeation;permeability coefficient;diffusion coefficient;solubility coefficient

收稿日期:2024-12-03　**修回日期:**2025-01-05

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB4000803)

0 引言

在全球能源结构转型升级的背景下，运氢特种设备中的塑料内胆高压运氢气瓶凭借其轻质、耐疲劳、高储氢密度等显著优势，在氢能源汽车领域占据了重要地位[1-3]。储氢气瓶塑料内胆材料，主要由尼龙（PA）和高密度聚乙烯（HDPE）制成，为氢气的安全存储与运输提供可靠保障。然而，与铝内胆相比，塑料内胆面临的一个主要挑战是氢气分子可能通过材料分子空隙渗透至外界，特别是在高压环境下，过高的氢渗透率可能引发氢气聚集燃爆事故[4]。因此，高压环境下塑料内胆材料的氢渗透性能成为决定其是否能安全使用的关键因素[5]。针对这一问题，国际上相关研究机构和企业开展了对塑料内胆材料氢渗透性能的测试和优化[6-8]。日本九州大学成功开发了能够在最高试验压力90 MPa、温度范围-40~85 ℃的氢渗透试验装置，其O型圈自密封设计确保了试验数据的精确性[6]。TESTNET公司和KIWA公司也针对PA和HDPE材料，在20~90 MPa的工作压力范围内，测试了材料的氢渗透系数、扩散系数等关键参数[8]。

在高压氢环境中，塑料内胆的渗透系数、扩散系数和溶解系数的大小是衡量氢在材料中渗透、扩散和溶解难易程度的关键指标。然而，这些系数受到多种因素的影响，包括温度、压力及材料厚度等。SUN等[4]针对PA6材料开展了不同压力下的氢渗透试验，得到氢渗透系数随压力增加而降低的变化规律。KLOPFFER等[9]在低压条件下，开展了PA11，PE等材料的氢渗透试验，试验结果表明，材料的渗透系数随着温度的升高而增大。但目前针对厚度对高压塑料内胆储氢气瓶内胆材料氢渗透性能的影响规律相关研究尚少，尤其对于车载Ⅳ型储氢气瓶，其聚合物内胆的厚度因储氢性能和加工方式的差异而有所不同，可能会对氢分子在材料中的渗透、扩散能力产生影响。尽管KLOPFFER等[10]曾研究中密度聚乙烯（PE-MD）在特定环境下CO_2气体的渗透特性，并得出试样厚度对传输系数影响甚微的结论，但由于CO_2和H_2的物化特性存在较大差异，氢分子具有更强的穿透性；FUJIWARA等[6]针对不同厚度的HDPE材料开展了试验压力90 MPa条件下的氢渗透试验，试验结果表明，材料厚度对氢渗透性能并没有影响。上述学者针对不同材料厚度对渗透性能影响开展了相关研究，但用于内胆材料的PA6尚未开展相关研究。因此，需要进一步研究氢气对不同厚度PA材料的氢渗透性能。

本文利用高压氢环境下的塑料材料氢渗透试验系统，通过对不同厚度的储氢气瓶聚合物材料进行氢渗透性能试验，得到塑料内胆材料在氢环境下的具体参数。同时，借助Python软件，结合标准偏差法判断氢渗透过程的稳定状态，将滞后时间、渗透性能参数等算法集成封装于软件程序中，进一步增强计算结果的可靠性。研究可为车载Ⅳ型储氢气瓶塑料内胆材料的开发和选型提供有力的技术支撑。

1 氢渗透理论基础

气体在聚合物材料中的渗透行为通常用溶解-扩散机理来描述，主要依靠材料两侧的浓度差及气体分子与内胆材料分子间的相互作用力作为驱动力[11]。气体分子在聚合物材料中的渗透过程如下：首先，气体分子被塑料内胆的一侧壁面吸附或溶解；随后，依据浓度梯度在聚合物内部扩散；最终在另一侧壁面吸附。简而言之，渗透过程主要包括气体分子在气-固界面的溶解及在聚合物材料内部的扩散2个过程，两者共同构成了完整的渗透机制。

低压侧氢气渗透量的测试方法是材料氢渗透测试方法的关键，主要包括体积测量法、浓度变化法、压差法及质谱分析法等[11-15]。其中，体积测量法借助毛细吸管技术测定渗透气体的体积；浓度变化法则通过监控固定容积内气体浓度的变化来计算渗透量；压差法则通过监测压力变化来推算渗透量；而质谱分析法则利用质谱/色谱仪对低压侧氢气分子含量进行精确分析，从而计算渗透氢气的量。在上述众多检测方法中，质谱分析法因其检测结果精度高和性能稳定的特点，已成为国际公认的检测手段。本文采用此方法，将高压氢气通过高压管路系统输送到高压腔室中，使氢气沿材料厚度方向进行渗透；随后，在低压侧利用质谱/色谱仪[16-17]检测设备，采集分析渗透出的氢气量，并通过计算得到内胆的氢渗透系数、扩散系数及溶解系数。

2 计算方法研究及软件开发

2.1 计算方法研究

材料氢渗透系数P的计算方法可参考

GB/T 42610—2023《高压氢气瓶塑料内胆和氢气相容性试验方法》，具体公式如下：

$$P=\frac{\Delta Q}{\Delta t}\cdot\frac{B}{s\Delta p} \tag{1}$$

式中，P为材料的气体渗透系数，mol·m/(m²·s·Pa)；$\Delta Q/\Delta t$为稳定渗透时气体的传输速率，mol/s；B为圆片试样厚度，m；s为渗透试验时试样曝露于氢气的表面积，m²；Δp为渗透试验时试样高压侧与低压侧的压力差，Pa。

将累计渗透量随时间的变化数据拟合成曲线，当渗透达到稳态时，累计渗透量与时间呈线性关系。将稳态直线段反向延长至时间轴，交点即为“时滞”θ。扩散系数[6]可由下式计算得到：

$$D=\frac{B^2}{6\theta} \tag{2}$$

式中，D为扩散系数，m²/s；θ为稳定渗透时的滞后时间，s。

计算得出氢渗透系数P和氢扩散系数D后，根据Fick定律和Henry定律，按下式可得溶解系数：

$$S=\frac{P}{D} \tag{3}$$

式中，S为溶解系数，mol/(m³·Pa)。

从公式中看，试验过程及结果主要通过滞后时间影响扩散系数的计算，而滞后时间的准确性主要受材料氢渗透稳定平衡时间判断选取的影响。在计算滞后时间和扩散系数时，人为判断选取稳定渗透平衡时间段会导致扩散系数及溶解系数的计算结果产生误差。因此，本文通过开发计算软件，针对材料渗透性能相关系数开展相关计算。

2.2 计算软件开发

氢渗透试验需要对整个试验过程中材料的氢气渗透量实时监测，采集渗透氢气量和时间的数据，材料氢渗透性能相关系数的计算主要通过对试验过程中检测设备采集到的实时渗透氢气量进行分析处理，计算得到相关性能参数。计算的关键在于渗透到达稳定状态的时间和稳定渗透时间段的判断选取，这直接影响到渗透系数和扩散系数的准确性。

为避免人为判断造成的误差，提高相关参数的计算准确性，根据氢渗透相关性能参数的计算方法，借助Python工具，开发氢渗透试验相关性能参数计算软件。该软件将数据分析处理过程、稳态判断及氢渗透性能相关系数计算方法等集成封装于一体。

本计算软件需输入试样厚度、半径、试验压力、温度、采样时间间隔及低压侧氢气浓度时序数据等参数，通过分析氢浓度变化的统计特征实现渗透稳态的自动判定。软件以初始采样时刻为零点，计算设定时间窗口内浓度数据的标准差与均值之比，当波动幅度小于1%时判定进入稳定渗透阶段，据此确定稳态起始时刻及持续时间段。采用trapezoid函数梯形积分法处理累计浓度曲线，在稳态区间内通过polyfit函数对稳定渗透状态的积分曲线进行一元多项式拟合，得到渗透量-时间线性关系，反推拟合直线与时间轴交点获取时滞，结合试样几何参数计算扩散系数。软件集成渗透系数、扩散系数及溶解系数的联立求解算法，实现从原始数据到性能参数的全自动解析，显著提升计算效率，增强了结果的可靠性。

2.3 计算软件可靠性验证

为验证计算软件的可靠性及适用性，本文利用该计算软件，对文献[16]中氢渗透试验得到的相关数据进行计算，得到氢渗透性能相关系数，并与文献[16]中的计算结果进行比对，结果如表1所示。

表1 计算软件验证结果

Tab.1 Calculation software verification

P_1/(mol·m⁻¹·s⁻¹·Pa⁻¹)	P_2/(mol·m⁻¹·s⁻¹·Pa⁻¹)	误差/%	D_1/(m²·s⁻¹)	D_2/(m²·s⁻¹)	误差/%	S_1/(mol·m⁻³·Pa⁻¹)	S_2/(mol·m⁻³·Pa⁻¹)	误差/%
9.25×10^{-16}	9.10×10^{-16}	1.62	1.35×10^{-10}	1.38×10^{-10}	2.22	6.87×10^{-6}	6.59×10^{-6}	4.01
7.40×10^{-16}	7.23×10^{-16}	2.30	1.20×10^{-10}	1.15×10^{-10}	4.17	6.17×10^{-6}	6.29×10^{-6}	1.90
6.32×10^{-16}	6.12×10^{-16}	3.16	1.01×10^{-10}	1.03×10^{-10}	1.98	6.25×10^{-6}	5.94×10^{-6}	4.93
5.08×10^{-16}	5.20×10^{-16}	2.36	0.91×10^{-10}	0.93×10^{-10}	2.20	5.57×10^{-6}	5.59×10^{-6}	0.38

注：P_1，D_1，S_1为文献[16]中计算结果；P_2，D_2，S_2为软件计算结果。

由表1可以看出,通过该软件计算得到的相关系数差别在5%以内,验证了该计算软件的可靠性与准确性,可用于后续试验计算。

3 塑料内胆材料试验研究

3.1 试验装置及原理

采用的氢渗透试验装置最高可提供90 MPa的高压氢气环境,试验温度范围为-60~90 ℃,主要由高压试验系统、低压检测系统和软件控制系统等组成。其中,高压试验系统包括高压测试夹具、高低温试验箱、高压氢气增压及管路系统等;低压检测系统用于监测内胆材料的渗透氢气量,主要由质谱/色谱仪检测仪器及低压管路组成;软件控制系统用于管路氢气置换、加压及泄压操作的远程控制、远程监测及防护等功能。本试验装置主要通过氢气增压泵将氢气增压至试验压力,经过缓冲罐及高压管路,为高压测试夹具中试样的高压侧提供高压氢环境,用于模拟气瓶实际工况;同时,通过高低温试验箱提供极限的试验温度。试样在高压侧的氢气压力作用下发生氢渗透,渗透到低压侧的氢气通过低压侧管路输入质谱/色谱仪。对渗透氢气量进行实时监测,并通过对试验过程中的氢气渗透数据进行分析计算,得到材料的氢渗透性能参数。试验装置构成如图1所示。

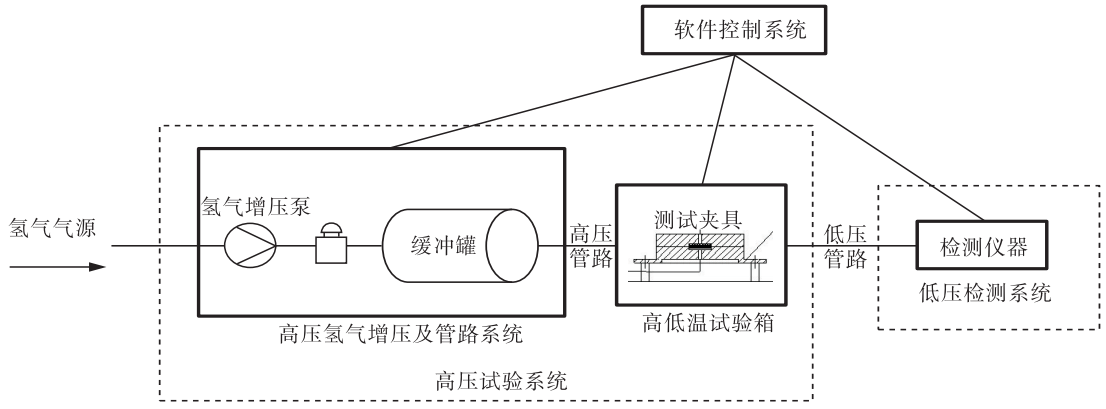


图1 氢渗透试验装置构成示意

Fig.1 Schematic diagram of hydrogen permeation test platform

3.2 材料试样的制备和选取

本次试验选取的储氢气瓶内胆材料为PA11。由于目前现有的高压塑料内胆储氢气瓶的工作压力一般为35~70 MPa,气瓶工作环境温度为-40~60 ℃,因此,试验选取了3组厚度(2.0,4.0,6.0 mm)的内胆材料,在40 MPa+55 ℃及70 MPa+15 ℃等试验条件下进行测试。具体试验条件及试样参数如表2所示,制备的内胆材料试样如图2所示。



图2 圆片试样

Fig.2 Disc sample

表2 材料试样尺寸及试验条件

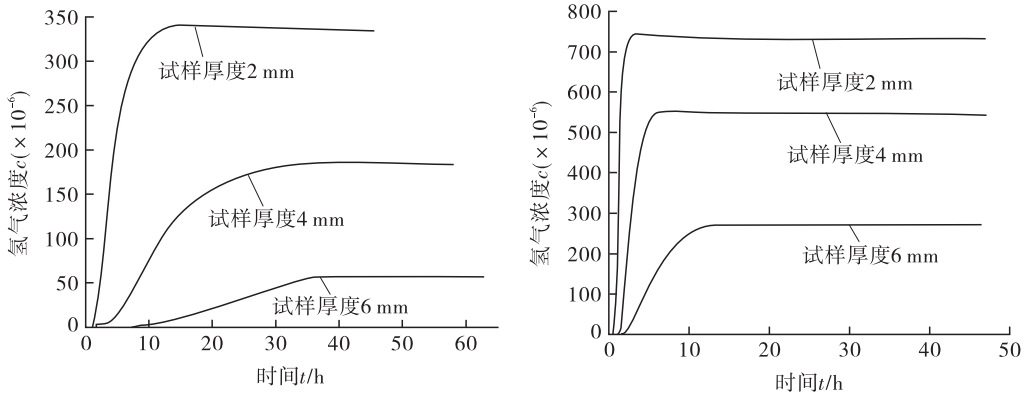
Tab.2 Material sample size and test conditions

编号	试验压力/MPa	试验温度/℃	试样直径/mm	渗透直径/mm	试样厚度/mm
1	70	15	78	40	2.0
2	70	15	78	40	4.0
3	70	15	78	40	6.0
4	40	55	78	40	2.0
5	40	55	78	40	4.0
6	40	55	78	40	6.0

3.3 试验过程与结果

将制备的试样安装于高低温箱内的测试夹具中，通过氢气增压泵和温箱提供试验所需压力和温度，开始采集试样低压侧的氢气浓度。在高压作用下，氢气从试样高压侧向低压侧渗透，低压侧渗透氢气由低压氮气载气带入质谱/色谱仪，实时监测渗透氢气浓度。将3种不同厚度的PA11圆片试样，分别按上述试验步骤在不同工况（见表2）下进行试验，得到PA11圆片试样低压侧渗透氢浓度随时间变化的曲线，如图3所示。2组试验相邻2次采样时间间隔为3 min。

由图3可以看出，随着试样厚度增加，氢渗透通量呈显著递减趋势。这种厚度依赖性源于材料微观结构的多尺度特征：多相体系中，结晶区与非晶区的空间分布形成曲折的氢扩散路径，而晶界缺陷与第二相夹杂物则作为氢陷阱位点进一步阻滞渗透过程。厚度增加导致结晶度提升，从而使得氢气逸散的通道更为复杂，传递与扩散过程受阻。



（a）试验压力70 MPa，温度15 ℃ （b）试验压力40 MPa，温度55 ℃

图3 氢渗透曲线

Fig.3 Hydrogen permeability curves

3.4 渗透参数计算与分析

通过开发的氢渗透计算程序计算试样渗透性能参数，获得不同厚度试样的渗透系数、扩散系数及溶解系数，如表3所示。不同参数随样品厚度的变化趋势，如图4~6所示。

表3 氢渗透性能参数计算结果

Tab.3 Calculation results of hydrogen permeation performance parameters

编号	试验压力/MPa	试验温度/℃	试样厚度/mm	渗透系数/（mol·m^{-1}·s^{-1}·Pa^{-1}）	扩散系数/（m^2·s^{-1}）	溶解系数/（mol·m^{-3}·Pa^{-1}）
1	70	15	2.0	2.571×10^{-16}	4.027×10^{-11}	6.384×10^{-6}
2	70	15	4.0	2.801×10^{-16}	5.732×10^{-11}	4.887×10^{-6}
3	70	15	6.0	1.302×10^{-16}	7.233×10^{-11}	1.800×10^{-6}
4	40	55	2.0	9.762×10^{-16}	14.13×10^{-11}	6.908×10^{-6}
5	40	55	4.0	14.58×10^{-16}	25.69×10^{-11}	5.675×10^{-6}
6	40	55	6.0	10.90×10^{-16}	27.81×10^{-11}	3.920×10^{-6}

从图4可以看出，随着试样厚度的增加，氢渗透系数呈下降趋势。这一现象的出现，主要是因为在试样成型过程中，聚合物流动冷却时，试样表面和内部的流动状态不同，使得扩散路径在试样的不同深度存在差异。材料变厚使得成型时内部的扩散路径变长，气体分子渗透时需要穿过更长的路径，进而减缓了气体扩散速率，最终降低了渗透系数。此外，厚度的增加可能会使材料内部排列更紧密，密度增大，导致氢气活动的自由通道减少，这同样会降低材料的渗透性能。

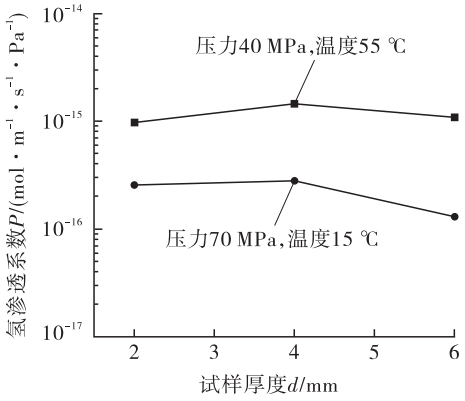


图4 渗透系数曲线

Fig.4 Permeability coefficient curves

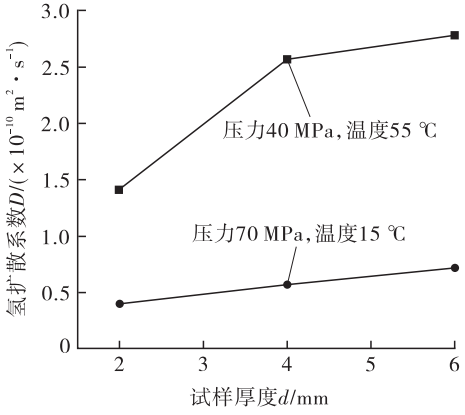


图5 扩散系数曲线

Fig.5 Diffusion coefficient curves

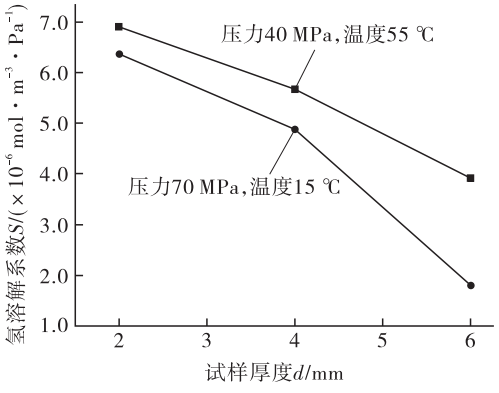


图6 溶解系数曲线

Fig.6 Solubility coefficient curves

然而,由图5可以看出,扩散系数呈现出不同的变化趋势。在一定的厚度范围内,扩散系数随着试样厚度的增加而上升。这是由于随着材料厚度增加,试样成型过程中表面和内部存在温度差,致使材料内部的致密程度降低,分子间间隙增大,氢气在材料内部的扩散能力增强,从而使材料的扩散系数增加。

从图6可以看出,随着试样厚度的增加,溶解系数呈现出下降的趋势。这一现象可能是因为随着样品厚度的增加,在成型过程中其冷却速度变慢,使得试样的结晶过程更加充分、完整。而结晶程度的提高,会导致试样对氢气的溶解度降低,进而使得溶解系数呈现出下降的趋势。

在本次试验过程中,误差主要来源于试验环境温度的变化与结果处理过程中产生的计算误差。为了减少误差,通过标准偏差法对稳态时间阶段进行定量判断,并将各渗透性能系数的计算方法进行集成,以此来计算各个参数。这种方式有效减少了结果分析中因人为判断和计算而产生的误差,显著提高了试验结果的可靠性与准确性。但在求解扩散系数的过程中,对氢渗透浓度积分曲线稳态阶段进行拟合时所产生的误差,目前仍难以避免。

4 结语

(1)基于时滞法理论框架,开发了氢渗透参数专用计算软件,通过积分渗透量-时间曲线构建累计渗透通量函数,采用移动窗口算法动态计算指定时间窗内渗透量数据的标准差与均值比值,当波动幅度小于1%时判定系统达到稳态平衡。软件集成稳态区间识别、滞后时间计算及渗透系数解算模块,实现从原始数据到性能参数的全流程自动化处理。为验证算法可靠性,选取文献中典型聚合物材料的氢渗透试验数据进行对比分析,结果表明,软件计算的扩散系数与文献值的相对偏差小于5%,证实该方法在提升计算效率的同时有效保障了结果准确性,为高压储氢材料渗透性能评估提供了标准化分析工具。

(2)研究了车载Ⅳ型储氢气瓶样品厚度对渗透行为的影响规律。随着试样厚度的增加,其渗透系数与溶解系数呈下降趋势;然而,扩散系数却随着试样厚度的增加而上升。这可能是由于不同厚度材料在成型过程中内部微观结构的变化导致的。在高压塑料内胆储氢气瓶制造与实际应用中,这一现象不容忽视。研究结果表明,适当增加内胆厚度可有效降低氢渗透风险,因此在保证气瓶轻量化的前提下,可通过优化内胆厚度来提升储氢安全性,为工程设计提供重要参考。

参考文献:

[1] ADAMS P, BENGAOUER A, CARITEAU B, et al. Allowable hydrogen permeation rate from road vehicles [J]. International Journal of Hydrogen

Energy,2011,36(3):2742-2749.

[2] 张杰,蒋文杰,杨锐,等.70 MPa碳纤维缠绕储氢气瓶结构设计与力学性能研究[J].压力容器,2023,40(3):28-37.
ZHANG J, JIANG W J, YANG R, et al. Study on structural design and mechanical properties of 70 MPa carbon fiber wound hydrogen storage cylinder [J].Pressure Vessel Technology,2023,40(3):28-37.

[3] 王云峰,王哲,徐双庆,等.高压Ⅳ型储氢气瓶充氢工艺分析[J].流体机械,2024,52(10):24-32.
WANG Y F, WANG Z, XU S Q, et al. Numerical analysis of hydrogen charging process for the high-pressure type Ⅳ hydrogen storage cylinder[J]. Fluid Machinery,2024,52(10):24-32.

[4] SUN Y,LV H,ZHOU W,et al.Research on hydrogen permeability of polyamide 6 as the liner material for type Ⅳ hydrogen storage tank [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(46): 24980-24990.

[5] DUNCAN B C, URQUHART J M, ROBERTS S. Review of measurement and modelling of permeation and diffusion in polymers[R]. UK: National Physical Laboratory,DEPC MPR 012,2005:1-73.

[6] FUJIWARA H,ONO H,ONOUE K,et al.High-pressure gaseous hydrogen permeation test method-property of polymeric materials for high-pressure hydrogen devices (1) [J]. International Journal of Hydrogen Energy,2020,45(53):29082-29094.

[7] BLANC-VANNET P, PAPIN P, WEBER M, et al. Sample scale testing method to prevent collapse of plastic liners in composite pressure vessels [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(17):8682-8691.

[8] SMITH B, ANOVITZ L. Lifecycle verification of polymeric storage liners[C]//Hydrogen Storage Tech Team Meeting, USCAR. Southfield, Michigan, 2013: 154-159.

[9] KLOPFFER M H, BERNE P, ESPUCHE É. Development of innovating materials for distributing mixtures of hydrogen and natural gas-Study of the barrier properties and durability of polymer pipes[J]. Oil & Gas Science and Technology, 2015, 70(2): 305-315.

[10] KLOPFFER M H, FLACONNECHE B. Transport properdines of gases in polymers: Bibliographic review [J].Oil & Gas Science and Technology,2001,56(3): 223-244.

[11] NAYLOR T D. Polymer properties: Permeation properties[J].Comprehensive Polymer Science,1989, 2:643-667.

[12] HIROTADA F, HIROAKI O, KIYOAKI O, et al. High-pressure gaseous hydrogen permeation test method-property of polymeric materials for highpressure hydrogen devices [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(53): 29082-29094.

[13] MATTEUCCI S, YAMPOLSKII Y P, FREEMAN B D, et al. Transport of gases and vapors in glassy and rubbery polymers[M].John Wiley & Sons,Inc.,2015.

[14] BUDZIEN J L, MCCOY J D, WEINKAUF D H, et al. Solubility of gases in amorphous polyethylene [J]. Macromolecules,1998,31(10):3368-3371.

[15] 熊耀强,吴平,赵建平.Ⅳ型储氢气瓶内衬材料的氢渗透行为分子动力学模拟[J].压力容器,2023,40(7):19-28.
XIONG Y Q, WU P, ZHAO J P. Molecular dynamics simulations on hydrogen permeation of modified polymer liner for type Ⅳ storage vessels[J]. Pressure Vessel Technology,2023,40(7):19-28.

[16] HUMPENODER J. Gas permeation of fibre reinforced plastics[J].Cryogenics,1998,38(1):143-147.

[17] RUDIN A, CHOI P. Diffusion in polymers [M]. The Elements of Polymer Science & Engineering, Elsevier,2013:275 - 304.

作者简介:杨超(1988),男,工程师,主要从事压力容器结构完整性的技术研究及国家标准和安全技术的研究工作,通信地址:201601 上海市松江区泗泾镇泗祥路518弄37号,E-mail:yangchao11yy@163.com

通信作者:骆辉(1980),男,高级工程师,主要从事承压类特种设备安全性能、无损检测技术等研究工作,通信地址:200949 上海市宝山区罗东路1505号中国特种设备检测研究院上海长管拖车检验站,E-mail:495845643@qq.com。

本文引用格式:
杨超,张来明,江一凡,等.Ⅳ型储氢气瓶塑料内胆材料厚度对渗透性能的影响及渗透参数计算方法研究[J].压力容器,2025,42(1):54-60.
YANG Chao, ZHANG Laiming, JIANG Yifan, et al. Study on the effect of polymer liner thickness on hydrogen permeation performance and calculation methods for permeation parameters in type IV hydrogen storage cylinders[J].Pressure Vessel Technology,2025,42(1):54-60.