DOI: 10.19666/j.rlfd.202506116

基于文丘里引射效应的固-气复合储氢反应器放氢性能优化研究

王宇航[1]，阚晓雨[1]，高 明[2]，尹 智[3]
（1. 中国矿业大学低碳能源与动力工程学院，江苏 徐州 221116；
2. 山东大学核科学与能源动力学院，山东 济南 250002；
3. 青岛康普锐斯能源科技有限公司，山东 青岛 266400）

［摘 要］针对传统固-气复合储氢反应器中存在的流量调控困难与压力匹配不协调等问题，提出一种融合文丘里引射效应的新型反应器结构，构建多物理场耦合的数值模型，研究喷嘴结构参数及关键运行条件对放氢性能的影响，并与单一储氢方式进行对比分析。研究结果表明：喷嘴几何参数对引射性能具有显著的非线性影响，其中长度为 9~13 mm、直径约为 0.4 mm 的喷嘴在稳定性与引射效率之间实现了较优权衡；高压氢入口压力的升高可提高瞬时流量输出，但会降低引射比；出口背压的升高虽有助于提升引射比，但抑制了气体射流能力与动态响应速度；提高固态储氢单元的热管理温度可加快初期释氢速率，但对中后期影响有限。在固、气复合比为 1:1 的条件下，该复合储氢方案较 20 MPa 气态储氢方案体积减少约 34.4%，压缩能耗降低约 41.7%；相较于单一固态储氢方案，热管理能耗减少约 50.0%，展现出显著的能效协同优势。上述研究为固-气复合储氢反应器的结构优化与运行策略制定提供了理论基础与工程指导。

［关 键 词］固-气复合储氢；文丘里引射效应；放氢性能；结构优化；数值模拟

［引用本文格式］王宇航，阚晓雨，高明，等. 基于文丘里引射效应的固-气复合储氢反应器放氢性能优化研究[J]. 热力发电，2026, 55(3): 130-137. WANG Yuhang, KAN Xiaoyu, GAO Ming, et al. Optimization on hydrogen desorption performance of a solid-gas coupled hydrogen storage reactor based on Venturi ejector effect[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(3): 130-137.

Optimization on hydrogen desorption performance of a solid-gas coupled hydrogen storage reactor based on Venturi ejector effect

WANG Yuhang[1], KAN Xiaoyu[1], GAO Ming[2], YIN Zhi[3]
(1. School of Low Carbon Energy and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
2. School of Nuclear Science, Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250002, China;
3. Qingdao Compress Energy Technology Co., Ltd., Qingdao 266400, China)

Abstract: To address the challenges of flow regulation and pressure mismatch in conventional solid-gas coupled hydrogen storage reactors, this study proposes a novel reactor configuration incorporating the Venturi entrainment effect. A multi-physics coupled numerical model is developed to investigate the influence of nozzle structural parameters and key operating conditions on hydrogen release performance, and comparative analyses are conducted against single-mode hydrogen storage systems. The results demonstrate that nozzle geometry has a significant nonlinear effect on entrainment performance. Specifically, a nozzle with a length of 9~13 mm and diameter of approximately 0.4 mm achieves an optimal balance between system stability and entrainment efficiency. Increasing the high-pressure hydrogen inlet pressure enhances the instantaneous flow rate but reduces the entrainment ratio. Higher outlet backpressure

收 稿 日 期：2025-06-05 修 回 日 期：2025-07-18 接 受 日 期：2025-07-29
基 金 项 目：中央高校基本科研业务费专项资金资助（2025QN1128）；山东省科技型中小企业创新能力提升工程（2025TSGCCZZB0196）
Supported by: Fundamental Research Funds for the Central Universities (2025QN1128); Science and Technology Innovation Capability Improvement Project of Medium-sized Enterprises in Shandong Province (2025TSGCCZZB0196)
第一作者简介：王宇航（1994），男，博士，副教授，氢能存储与燃料电池技术，wyhkd@cumt.edu.cn。

improves the entrainment ratio but suppresses the jet strength and dynamic response. Elevating the thermal management temperature of the solid-state hydrogen storage unit accelerates the initial hydrogen release rate, but its influence on the later stages is limited. With a solid-to-gas ratio of 1:1, the coupled hydrogen storage scheme reduces the volume by approximately 34.4% and the compression energy consumption by about 41.7% compared to a 20 MPa gaseous hydrogen storage scheme. Compared to the single-mode solid-state storage scheme, thermal management energy consumption of this coupled scheme reduces by nearly 50.0%, demonstrating a significant advantage in energy efficiency synergy. This study provides a theoretical foundation and engineering guidance for the structural optimization and operational strategy development of solid-gas coupled hydrogen storage reactors.

Key words: solid-gas coupled hydrogen storage; Venturi ejector effect; hydrogen release performance; structural optimization; numerical simulation

氢能作为实现“碳中和”目标的关键能源载体，其高效储存技术已成为当前研究热点[1-2]。当前常见的高压气态储氢受限于材料强度导致体积密度不足，且更高压力会带来更大的安全隐患，而低温液态储氢则面临高达 30%的相变能耗与长期存储的蒸发损耗[3]。金属氢化物（metal hydride，MH）固态储氢体积密度高，可在近常温常压下存储，在一些加氢站和能源系统中已发挥重要作用[4]。然而其固有的缓慢动力学及热传输特性依然是限制此类技术发展的内在因素[5]。

国内外学者致力于对固态储氢三维模型的构建与性能优化研究，探究了储放氢过程中的反应动力学、反应器内温度的演变机制等问题，针对反应器的结构、尺寸、内/外部传热方式等方面提出了各种强化传热方法，包括添加翅片、布置热管、改进换热器结构等[6-7]。然而，固态储氢的材料属性限制了储放氢速率、质量储氢密度和动态响应性的进一步提升[8]。尤其是在大规模储氢应用中，单纯依靠材料改性和传热强化难以突破性能瓶颈[9]。随着国内外对氢能需求的不断增长，单一的气态或固态储氢方式难以同时兼顾氢能储用过程中的多应用场景要求[10]。

固态与气态储氢的复合模式，既能利用气态储氢的中高压特性和快速释放能力，又能结合固态储氢的高体积储氢密度优势，为解决上述问题提供了新思路。国内外针对固−气复合储氢方式已开展了部分探索性研究，主要可分为 4 类。第 1 类是在固态储氢反应器的基础上增设膨胀区，使固态与气态储氢按一定比例共存于同一容器内[7]。一些研究采用高压固态储氢材料，如 $NaAlH_4$ 和 AlH_3 等，以提高膨胀式复合储氢的质量密度[11]。Liu 等人[12]基于实验测量，优化了固−气储氢质量配比，制备了工作压力低于 5 MPa、体积储氢密度高达 40.07 kg/m^3 的复合储氢罐。第 2 类为直通式，即利用加热或冷却后的气态氢直接通入固态储氢反应器，以替代传统热管理方式，促进储放氢过程[13]。第 3 类为级联式，即在固态储氢出口处设置气态储氢装置，使其作为缓冲单元，以调节氢气供应的动态波动[14]。第 4 类为并驱式，即固态与气态储氢系统协同运行，实现灵活的存储与供应，充分发挥静态与动态储放氢特性的互补优势[9]。

前 3 类复合储氢方式本质上仍是对固态储氢方式的外在延伸，运行过程依赖固态与气态的先后储放机制，难以充分发挥气态储氢的快速释放特性与固态储氢的高储氢密度在动态性能上的互补优势。然而，针对并驱式固−气复合储氢，其高压气态氢气与固态储氢罐中的低压氢气在放氢过程中难以实现氢气流量与压力的协同调控，这成为制约该新型储氢方式的关键瓶颈。

基于此，本文首次提出并构建基于文丘里效应的并驱式固−气复合储氢反应器，探究放氢过程中流量与压力的协同调控方法，分析关键结构参数与运行参数对放氢性能的影响。本研究的创新性在于，首次将文丘里引射效应引入固−气复合储氢系统，可实现储氢过程中流量与压力的有效耦合调控。构建的复合储氢反应器兼具固态储氢的高安全性与气态储氢的快速响应特性，在提升系统整体运行效率与动态调节能力方面展现出显著优势，为新型高效储氢系统的结构设计提供了新的技术路径。本文研究结论可为此类复合储氢技术提供理论指导，为工程应用提供优化途径。

1 模型构建

1.1 物理模型

图 1 为本文提出的固−气复合储氢反应器截面结构示意。储氢装置整体呈圆柱状，中间部分为金属氢化物固态储氢材料填充区。外部为换热介质区域，用于固态储氢热管理。内部为高压气态氢的流

通区，流通区入口由管道连接高压储氢罐，高压氢入口压力由调压阀调节。储氢装置出口设计为文丘里管结构，起到引射作用，高压氢由喷嘴流出，充当工作流体，金属氢化物脱附的氢气充当引射流体，在文丘里管中被高压氢引射后混合流出，供给燃料电池等用氢设备。

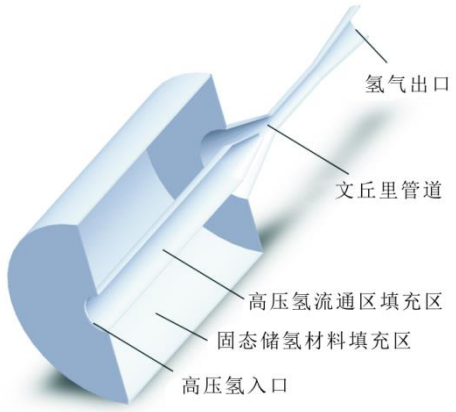


图 1 固−气复合储氢反应器截面结构示意
Fig.1 Schematic cross-section of the solid-gas coupled hydrogen storage reactor

1.2 数学模型

MH 放氢过程的数值计算模型遵循质量和能量守恒定律，可描述反应动力学、质量和能量的转移过程，反映运行参数对 MH 释氢速率的影响。MH 区域采用多孔介质模型，其能量守恒方程为：

$$(\rho C_p)_{\text{eff}}\frac{\partial T_{\text{MH}}}{\partial t}=\nabla(k_{\text{eff,MH}}\nabla T_{\text{MH}})-\dot{m}[\Delta H+T_{\text{MH}}(C_{p,\text{H}_2}-C_{p,\text{MH}})] \tag{1}$$

$$k_{\text{eff,MH}}=\varepsilon k_{\text{H}_2}+(1-\varepsilon)k_{\text{MH}} \tag{2}$$

式中：$(\rho C_p)_{\text{eff}}$ 为有效体积平均比热，J/(kg·K)；$k_{\text{eff,MH}}$ 为 MH 区域中的有效导热系数，W/(m·K)；ε 为 MH 区域的孔隙率；T_{MH} 为 MH 的温度，K；$\dot{m}$ 为单位体积氢气的质量流量，kg/s；ΔH 为 MH 的反应焓变，J/kg；C_{p,H_2} 和 $C_{p,\text{MH}}$ 分别为氢气和 MH 的比热容，J/(kg·K)。

MH 的放氢过程与罐中平衡压力、平衡温度和固态 MH 中的氢含量（*P-C-T*）密切相关[15]。本文采用的 MH 材料为 $LaNi_5$，其在放氢过程的 *P-C-T* 拟合公式表示为：

$$\ln\frac{p_{\text{eq}}}{p_{\text{ref}}}=A-\frac{B}{T_{\text{MH}}} \tag{3}$$

式中：A 和 B 为常数；p_{eq} 与 p_{ref} 分别为 MH 的平衡压力与参考压力，MPa，其中参考压力为 1 MPa。

单位体积内 MH 脱附氢气的速率为：

$$\dot{m}=-C_{\text{des}}\exp\left(-\frac{E_{\text{des}}}{RT_{\text{MH}}}\right)\times\left(\frac{p_{\text{H}_2}-p_{\text{eq}}}{p_{\text{eq}}}\right)\times(\rho_{\text{MH}}-\rho_{\text{MH,emp}}) \tag{4}$$

式中：C_{des} 为解吸常数，s^{-1}；E_{des} 为解吸活化能，J/mol；p_{H_2} 为 MH 罐中的氢气压力，Pa；R 为气体常数，J/(mol·K)；p_{eq} 为 MH 的平衡压力，Pa；$\rho_{\text{MH,sat}}$ 和 $\rho_{\text{MH,emp}}$ 分别为 MH 的饱和密度和完全放空时的密度，kg/m^3；ρ_{MH} 为当前 MH 的密度，kg/m^3。表 1 为 $LaNi_5$ 的主要模拟参数[11]。

表 1 $LaNi_5$ 的主要模拟参数
Tab.1 Main simulation parameters of $LaNi_5$

项目	数值	项目	数值
$\rho_{\text{MH,emp}}$/(kg·m^{-3})	7 164	E_{des}/(J·mol^{-1})	21 179.6
$\rho_{\text{MH,sat}}$/(kg·m^{-3})	7 259	C_{des}/s^{-1}	9.571
$C_{p,\text{MH}}$/(J·(kg·K)$^{-1}$)	419	ΔH/(J·kg^{-1})	1.539×10^7
p_{H_2} /(J·(kg·K)$^{-1}$)	14 890	ε	0.5
k_{H_2} /(W·(m·K)$^{-1}$)	0.181 5	A	10.57
k_{MH}/(W·(m·K)$^{-1}$)	2.000 0	B	3 704.6

2 模型验证与性能指标

2.1 模型验证

基于 Ansys Fluent 21R1 平台，构建了固−气复合储氢反应器罐体的二维轴对称数值模型。图 2 展示了该模型的网格划分与几何尺寸。模拟中的储氢合金质量约为 415.71 g，储氢量约为 5.51 g。在放氢过程中，罐体外部通过循环水加热，循环水温度在模拟验证过程中设定为等于外壁温度。外部的边界条件为热流边界条件，氢气出口为压力出口边界条件。

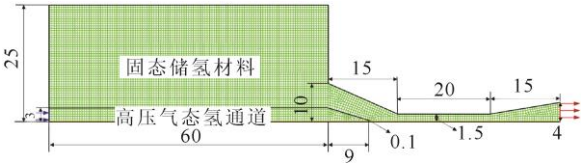


图 2 储氢罐模型的网格及尺寸(mm)
Fig.2 Mesh and dimensions of the hydrogen storage tank model

由于金属氢化物固态储氢部分涉及化学反应动力学和能量、质量源项，本文对金属氢化物放氢过程进行了模型验证。验证模型的尺寸参考文献[16]中的设置，其中固态储氢热管理温度由外部循环水提供，模拟中将循环水温度等效设定为储氢反应器外壁温度 313 K，将氢气出口压力设为 0.1 MPa。

在网格数分别为 13 473、24 540 和 54 843，步长分别为 0.1、0.2、0.5 s 的条件下对 MH 模型进行了模拟分析，并在相同工况下进行了网格独立性和步长独立性验证，具体如图 3 所示。此外，将模拟结果与文献中的数据进行了对比验证，结果如图 4 所示。综合考虑计算效率和准确性，本文选择了网格数为 24 540，步长为 0.2 s 进行后续的模拟。通过对比，本文的模拟结果与文献[16]中的数据基本吻合，因此该模型可用于后续的数值模拟研究。

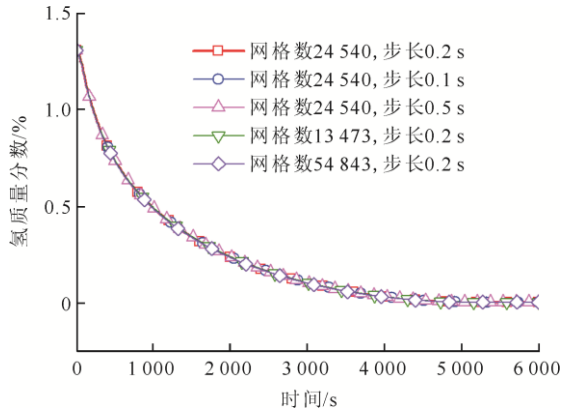


图 3 网格与步长独立性验证
Fig.3 Verification of grid and step independence

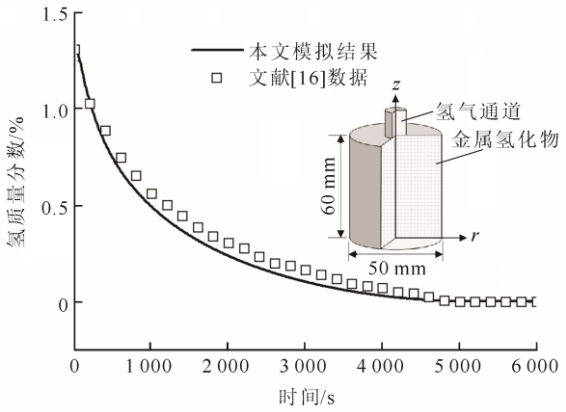


图 4 本文模拟结果与文献[16]中的数据对比
Fig.4 Comparison between the simulation results of this study and the data from Reference [16]

2.2 性能指标

1）引射比

将引射比 η_{ER} 定义为固态储氢材料的放氢流量与高压气态氢喷射流量之比，衡量高压气态氢对 MH 脱附氢气的吸入能力[17]：

$$\eta_{ER}=\frac{\dot{m}_{MH,H_2}}{\dot{m}_{high,H_2}} \tag{5}$$

式中：$\dot{m}_{MH,H_2}$ 为固态储氢材料的放氢流量，kg/s；$\dot{m}_{high,H_2}$ 为高压气态氢喷射的流量，kg/s。η_{ER} 越大，说明喷嘴利用高压氢气流对固态储氢材料脱附氢气的强化效果越显著。

2）系统整体能耗

储氢系统中的能耗主要来源于气态高压储氢所消耗的压缩功耗与固态储氢材料放氢过程的热管理能耗。其中固态储氢材料放氢过程的热管理能耗可由上述能量守恒方程获得。理想绝热状态下氢气压缩机消耗的功率可表示为[9]：

$$P_{com}=\frac{C_{p,H_2}T_{com}}{\eta}\left[\left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}-1\right]W_{com} \tag{6}$$

式中：T_{com} 为氢气压缩机入口温度，K；γ 为氢气标准状态下的绝热指数，取 1.4；η 为压缩机效率，取 0.95；W_{com} 为压缩机出口的氢气流速，kg/s；p_0 和 p_1 分别为压缩前、后的氢气压力，Pa。由于在氢气压力超过 10 MPa 时，其压缩过程偏离理想气体绝热压缩的程度增大。因此计算时引入压缩系数 Z 以补偿氢气的非理想状态，状态方程为 $PV=ZnRT$[18]。

3）放氢速率与出口压力

储氢系统中的放氢速率与出口压力不仅是衡量系统运行性能的核心指标，更直接关系到下游用氢设备（如燃料电池、电解合成系统或燃烧器等）稳定运行的连续性与响应特性，其主要受金属氢化物放氢反应动力学和喷射压差驱动影响。

3 结果与分析

本节将分析主要结构与运行参数对放氢性能的影响，对比不同储氢方式的性能差异与适应性。

3.1 主要结构参数对放氢性能的影响

在高压氢入口压力为 0.5 MPa、氢气出口压力为 0.1 MPa 固态储氢热管理温度为 330 K 的情况下，获得储氢反应器放氢运行至 1 000 s 时的温度变化云图与速度变化迹线如图 5 所示。温度云图表明固态储氢区域的温度主要由外部热量的热传导影响，速度变化迹线图显示了高压喷射氢对固态放氢的引射效果。高速主流区在喷嘴出口处形成明显的剪切层和涡旋结构，促使周围低速区域内的氢气被卷吸并随主流方向加速排出，体现出较强的引射效应。

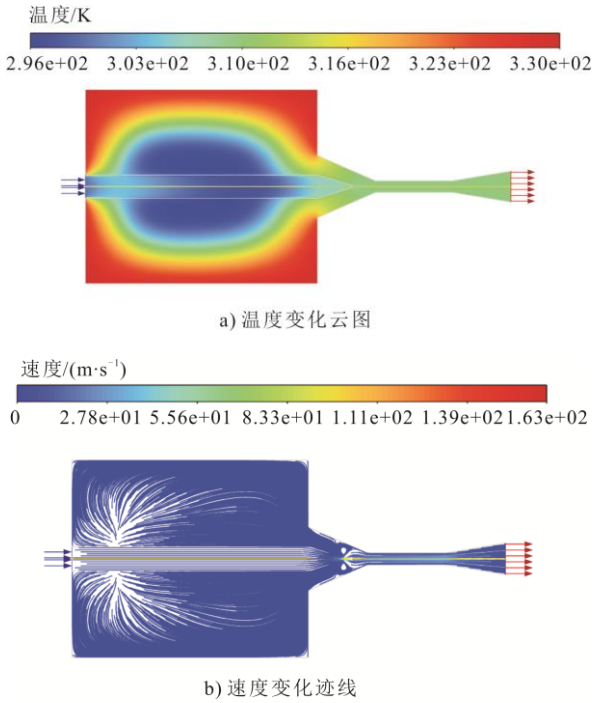


图 5 1 000 s 时的温度变化云图与速度变化迹线
Fig.5 Temperature contour and velocity streamlines at 1 000 s

1）喷嘴长度的影响

图 6 为不同喷嘴长度对放氢过程引射比的影响。随着喷嘴长度由 3 mm 增加至 15 mm，引射比呈上升趋势。其原因在于，在高压氢入口压力不变的情况下，喷嘴通道的加长增加了压力损失，导致其出口流量与压力下降，从而提升了引射比。然而，喷嘴过长将增加流动阻力，造成整体放氢速率下降，影响引射效率与稳定性。综合峰值引射比与运行稳定性，建议喷嘴长度为 9~13 mm。

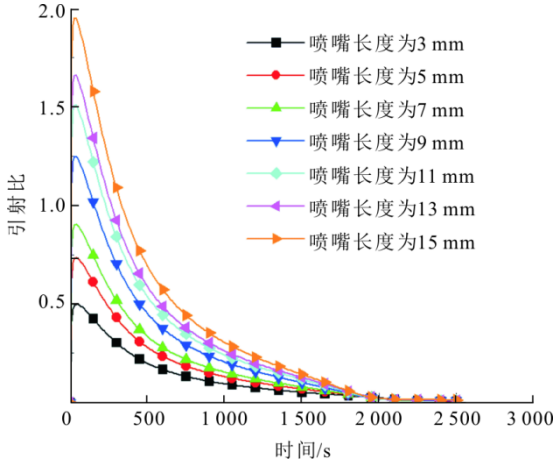


图 6 不同喷嘴长度对放氢过程引射比的影响
Fig.6 Effect of nozzle length on entrainment ratio during the hydrogen release process

2）喷嘴直径的影响

喷嘴直径决定了喷嘴的临界质量流量，图 7 为不同喷嘴直径对放氢过程引射比的影响。由图 7 可知，随着喷嘴直径由 0.2 mm 逐渐增大至 0.8 mm，引射比呈现明显下降趋势。该现象是由于喷嘴直径的增大，显著增大了高压气态氢的喷射流量，使得引射比降低，然而过大的喷嘴直径导致引射效率过低。喉部直径越小，流体加速效果越显著，但过小会导致压力阻力过大，高压氢的流量过低。较佳的喷嘴直径可选在 0.4 mm 左右，兼顾压力损失与引射效果。

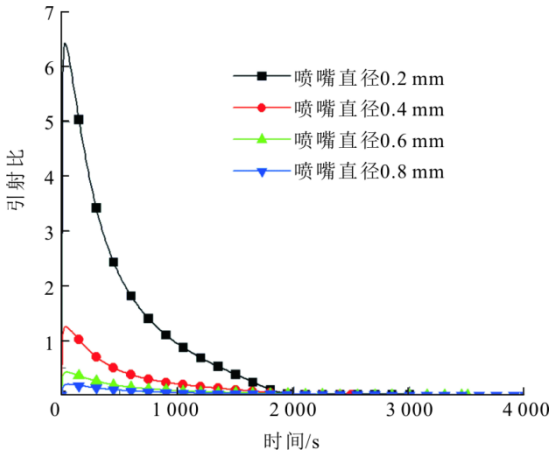


图 7 不同喷嘴直径对放氢过程引射比的影响
Fig.7 Effect of nozzle diameter on entrainment ratio during the hydrogen release process

3.2 主要运行参数对放氢性能的影响

在喷嘴长度 9 mm、喷嘴直径 0.4 mm 的情况下，研究了不同高压氢入口压力、氢气出口压力与固态储氢热管理温度对复合储氢反应器放氢过程性能的影响。

1）高压氢入口压力

图 8 为不同高压氢入口压力对复合储氢反应器放氢过程性能的影响。由图 8 可知，随着放氢过程的进行，氢气引射比均经历快速下降并趋于平缓的过程。随着高压氢入口压力的增加，氢气引射比逐渐减小，但氢气总出口流量增加。这是因为高压氢入口压力的增加使得高压气态氢的喷射流量增大，使得引射比呈降低趋势。更高的高压氢入口压力也会导致文丘里管道内的压力升高，进而使得固态储氢的出口背压升高，对固态放氢过程产生一定的抑制作用。因此，随着高压氢入口压力的增加，金属氢化物中氢含量的消耗速率减缓。此外，高压氢入口压力在引射效率与瞬时流量之间存在调控

权衡，其变化规律可为多场景工况下的参数设置提供依据。

综上，对于瞬时大流量、高功率用氢设备场景，可适当增大高压氢入口压力。对于长时间、平稳供氢场景，则可调节至较低的高压氢入口压力以提升引射比。通过灵活调节高压氢入口压力，可在瞬态响应与稳态性能之间实现较优平衡，从而满足多样化的场景需求。

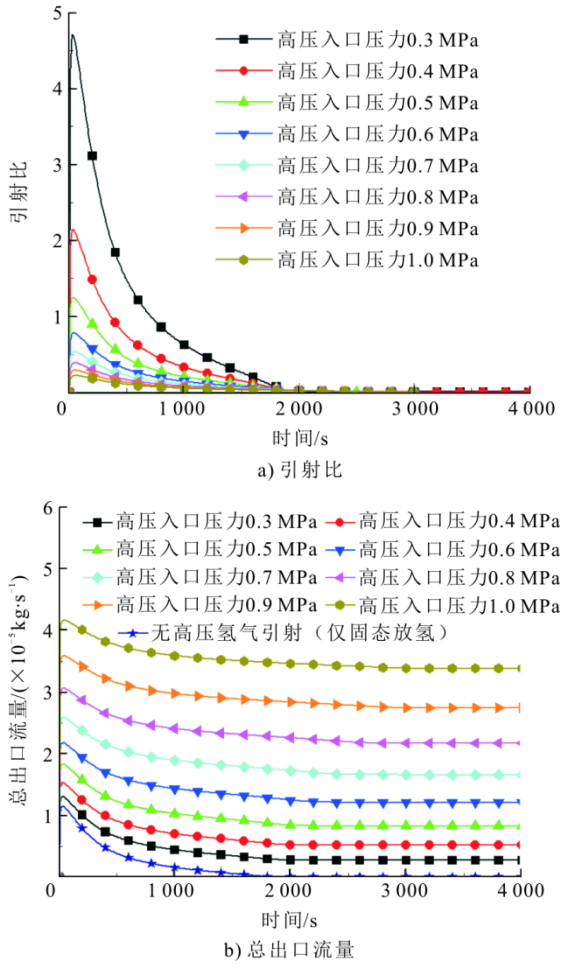


图 8 不同高压氢入口压力对复合储氢反应器放氢过程性能的影响

Fig.8 Influence of different high-pressure hydrogen inlet pressures

2）氢气出口压力

图 9 为不同氢气出口压力对复合储氢反应器放氢过程性能的影响。结果表明，随着出口压力从低值逐步升高，反应器总放氢流量呈下降趋势，但氢气引射比则逐渐增加。这是因为高氢气出口压力对高压气态氢喷射能力的抑制效果更大，相较于对金属氢化物释氢过程的影响更为显著。此外，出口压力升高导致金属氢化物中放氢速率降低，当超过 0.4 MPa 时更为显著。仅使用单一固态储氢时，其放氢速率最低，且难以通过快速调节手段实现变负荷需求。因此，对于用氢压力多变需求的场景，既需要合理分配固-气复合质量比例，同时可适当调整高压氢入口压力。

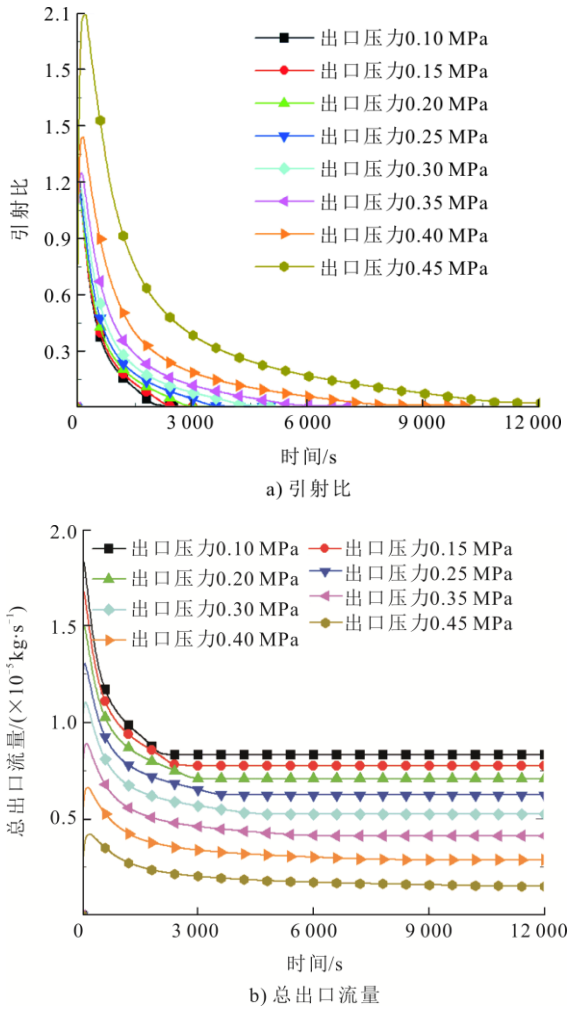


图 9 不同氢气出口压力对复合储氢反应器放氢过程性能的影响

Fig.9 Influence of different hydrogen outlet pressures

3）固态储氢热管理温度

图 10 为不同固态储氢热管理温度对复合储氢反应器放氢过程性能的影响。由图 10 可知，随着热管理温度的升高，氢气引射比与总出口流量在放氢初期阶段显著提高，在放氢后期迅速降低，直至固态储氢罐中的氢气耗尽。这是由于在放氢初期，固态储氢罐中的氢含量较高，热传导对放氢速率起主要作用，随着反应进行，氢含量逐渐降低，并且对放氢速率起主要作用。因此，对于高氢气流量需求的用氢设备，可采用提高固态储氢热管理温度与高压氢入口压力 2 种途径，尤其在氢含量较低时，增

大高压氢入口压力更具效果。

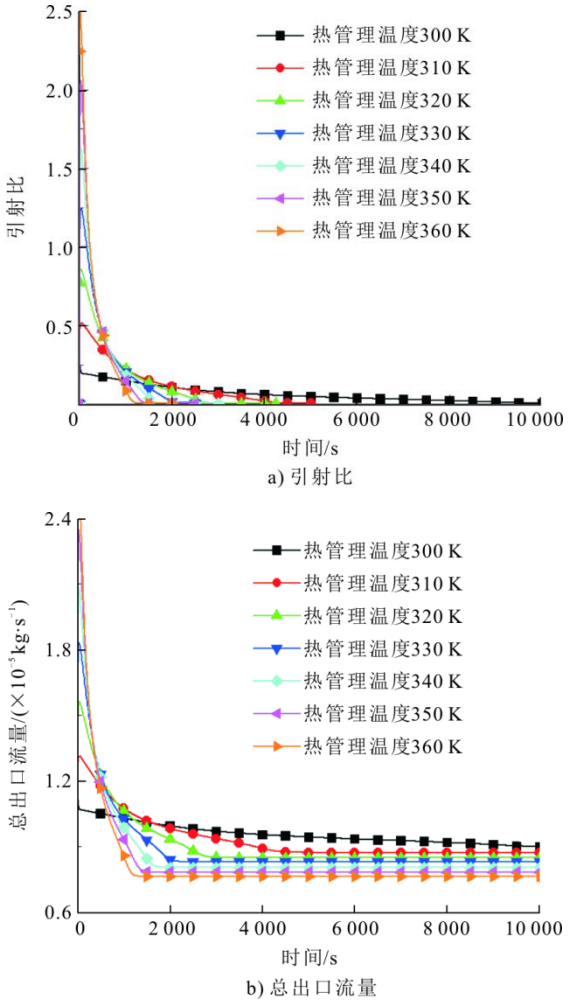


图 10 不同固态储氢热管理温度的影响

Fig.10 Influence of different thermal management temperatures for solid state hydrogen storage

3.3 综合性能对比分析

在相同的储氢量（11 g）下，分别对比了 20 MPa 气态储氢、0.5 MPa 固态储氢以及固−气复合储氢的不同储氢方式差异，具体见表 2。

相较于单一的气态或固态储氢，固−气复合储氢反应器在总体积、压缩能耗与热管理能耗 3 方面均表现出良好折中特性。在固−气复合比为 1:1 情况下，复合储氢总体积较纯气态方案降低约 34.4%，压缩能耗降低约 41.7%，热管理能耗则较纯固态储氢降低约 50.0%。此外，喷嘴结构参数的优化具有一定的固−气比例依赖性，不同比例下引射行为存在差异，需结合工况实现结构与性能的协同匹配。

文丘里引射结构强化了气流驱动与换热耦合，兼顾了低压固态储氢的安全性与高压气态储氢的快速响应性。相较单一储氢方式，该复合储氢反应器更适用于对空间、能耗、动态响应要求较高的分布式能源系统与车载储氢系统，并且可根据具体应用场景适当调节固−气复合比例。

表 2 不同储氢方式性能对比

Tab.2 Performance comparison of different hydrogen storage methods

性能参数	气态储氢	固态储氢	固−气复合储氢
储氢量/g	11.0	11.0	11.0
压力/MPa	20	0.5	0.5（固态）、20（气态）
总体积/m^3	7.45×10^{-4}	2.32×10^{-4}	4.03×10^{-4}（固−气比为 2:1）
			4.89×10^{-4}（固−气比为 1:1）
			5.74×10^{-4}（固−气比为 1:2）
压缩能耗/kJ	171.1	28.2	75.8（固−气比为 2:1）
			99.7（固−气比为 1:1）
			123.5（固−气比为 1:2）
热管理能耗/kJ	0	169.3	112.8（固−气比为 2:1）
			84.6（固−气比为 1:1）
			56.4（固−气比为 1:2）

4 结 论

本文针对固−气复合储氢反应器的放氢过程，研究了典型结构参数与关键运行条件对放氢性能的影响，对比评估了不同储氢方式的性能差异与适应性，主要结论如下。

1）在高压氢驱动下，适当增加喷嘴长度有助于提升引射效果，但过长将造成流动阻力加剧；喷嘴直径越小，引射比越高，但过小会限制气体流量，降低动态响应能力。综合考虑，引射性能较优的喷嘴结构建议为长度 9~13 mm、直径约 0.4 mm。

2）增大高压氢入口压力有利于提升瞬时出口流量，但引射比会下降；出口压力升高可显著提升引射比，但会抑制高压氢射流能力与固态释氢速率；固态储氢热管理温度升高可在初期阶段显著提升放氢速率，但对后期影响有限。不同工况下应根据应用场景对运行参数进行适配调节，以在响应速度与引射效率之间实现平衡。

3）与单一气态或固态储氢方式相比，固−气复合储氢反应器在总体积、压缩能耗与热管理能耗方面均表现出更优的协同特性，兼具高压响应速度与低压安全储氢能力。其中，在固−气复合比为 1:1 情况下，复合储氢总体积较纯气态方案降低约 34.4%，压缩能耗降低约 41.7%，热管理能耗则较纯固态储氢降低约 50.0%。此外，文丘里结构的引射耦合作用可有效促进固态释氢过程的压力驱动与热交换，提升整体性能。

本研究所获得的放氢过程动力学规律与性能对比结果具有良好的可拓展性，适用于不同材料体系与工况条件，可为此类新型固-气复合储氢反应器在分布式能源与车载氢能等场景中的应用提供理论支撑，对构建高安全性、多元化与高效率兼具的氢储能系统具有重要意义。

[参 考 文 献]

[1] DE KLEIJNE K, HUIJBREGTS M A J, KNOBLOCH F, et al. Worldwide greenhouse gas emissions of green hydrogen production and transport[J]. Nature Energy, 2024, 9: 1139-1152.

[2] 杨晓, 姚明宇, 韩伟, 等. 大规模可再生能源电解制氢技术现状及发展研究[J]. 热力发电, 2025, 54(5): 33-43.
YANG Xiao, YAO Mingyu, HAN Wei, et al. Review on current status and development of large-scale renewable energy electrolysis hydrogen production technology[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(5): 33-43.

[3] 张盛, 郑津洋, 戴剑锋, 等. 可再生能源大规模制氢及储氢系统研究进展[J]. 太阳能学报, 2024, 45(1): 457-465.
ZHANG Sheng, ZHENG Jinyang, DAI Jianfeng, et al. Research progress on renewable energy system coupled with large-scale hydrogen production and storage [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(1): 457-465.

[4] 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.

[5] WANG Y, ZHANG H, HE S, et al. Dynamic analysis and control optimization of hydrogen supply for the proton exchange membrane fuel cell and metal hydride coupling system with a hydrogen buffer tank[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 291: 117339.

[6] 陈泽祺, 曹红梅, 田忠玉, 等. 基于换热管束优化布置的固态储氢反应器储氢性能模拟研究[J]. 热力发电, 2024, 53(9): 100-108.
CHEN Zeqi, CAO Hongmei, TIAN Zhongyu, et al. Simulation on hydrogen storage performance in solid-state hydrogen storage reactor based on optimal arrangement of heat exchange tube bundles[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(9): 100-108.

[7] CUI Y, ZENG X, XIAO J, et al. The comprehensive review for development of heat exchanger configuration design in metal hydride bed[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(4): 2461-2490.

[8] YE H, TAO Y B, YU X K, et al. Optimization on distribution of high thermal conductivity materials in metal hydride reactor for improving heat transfer performance[J]. Renewable Energy, 2024, 235: 121288.

[9] WANG Y, DAI H, CHEN Z, et al. Simulation study on a novel solid–gas coupling hydrogen storage method for photovoltaic hydrogen production systems[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 299: 117866.

[10] ZHU C, MOU X, BAO Z. Optimization of tree-shaped fin structures towards enhanced discharging performance of metal hydride reactor for thermochemical heat storage based on entransy theory[J]. Renewable Energy, 2024, 220: 119585.

[11] 周超, 王辉, 欧阳柳章, 等. 高压复合储氢罐用储氢材料的研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(1): 117-126.
ZHOU Chao, WANG Hui, OUYANG Liuzhang, et al. The state of the art of hydrogen storage materials for high-pressure hybrid hydrogen vessel[J]. Materials Reports, 2019, 33(1): 117-126.

[12] LIU H, XU L, HAN Y, et al. Development of a gaseous and solid-state hybrid system for stationary hydrogen energy storage[J]. Green Energy & Environment, 2021, 6(4): 528-537.

[13] SHAO L, LIN X, BIAN L, et al. Engineering control strategy of hydrogen gas direct-heating type Mg-based solid state hydrogen storage tanks: a simulation investigation[J]. Applied Energy, 2024, 375: 124134.

[14] WANG Y, DAI H, CAO H, et al. Performance optimization study on the thermal management system of proton exchange membrane fuel cell based on metal hydride hydrogen storage[J]. Energy, 2024, 305: 132409.

[15] 王瀚彬, 胡帅, 毕丰雷, 等. 新型波纹翅片金属氢化物反应器的放氢性能有限元分析[J]. 化工学报, 2025, 76(1): 221-230.
WANG Hanbin, HU Shuai, BI Fenglei, et al. Desorption performance analysis of a metal hydride reactor with novel corrugated fins based on finite element method[J]. CIESC Journal, 2025, 76(1): 221-230.

[16] CHUNG C A, HO C J. Thermal-fluid behavior of the hydriding and dehydriding processes in a metal hydride hydrogen storage canister[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(10): 4351-4364.

[17] SONG Y, WANG C, WANG L, et al. Design criterion of critical mode ejector for PEMFC hydrogen supply and recycle system[J]. Applied Energy, 2025, 377: 124566.

[18] JENSEN J O, VESTBØ A P, LI Q, et al. The energy efficiency of onboard hydrogen storage[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2007, 446/447: 723-728.

（责任编辑　邓玲惠）