



叶脉仿生翅片结构对储氢反应器传热与反应性能的协同优化

赵宏鹏^{1,2}, 胡碧洲¹, 李东耀², 苏昊翔¹, 兰景瑞¹, 李浩然¹, 洪文鹏¹

(¹东北电力大学能源与动力工程学院, 吉林 长春 132012; ²中国电力工程顾问集团东北电力设计院有限公司, 吉林 长春 130000)

摘要: 本研究针对金属氢化物储氢过程中传热受限的问题, 通过数值模拟研究了叶脉仿生翅片结构及其操作参数对储氢性能的影响。在翅片体积相同的条件下, 设计了3种不同分形复杂度的结构(I型、II型、III型), 系统分析了不同结构以及入口压力、传热流体流速与温度对反应过程的影响。结果表明, III型翅片通过增加有效传热面积和强化径向热扩散, 显著提升了反应器内温度分布的均匀性, 形成了稳定的径向温度梯度。在相同工况下, 其吸氢完成时间为670 s, 较I型翅片缩短38.5%, 验证了结构优化对传热与反应动力学的协同增强作用。参数分析显示: 入口压力升至1.0 MPa前, 反应加速显著, 超过后促进作用趋于稳定; 传热流体流速超过1.0 m/s后, 传热逐渐由内部热传导主导, 继续提升流速, 性能提升效果有限; 传热流体温度降至296.15 K以下后性能提升趋缓, 考虑能耗因素, 建议在近室温条件下运行。综上所述, 采用多级分支叶脉仿生翅片结构, 并结合适宜的操作参数, 可有效协同优化金属氢化物储氢反应器的传热与反应性能, 本研究为其工程应用提供理论依据。

关键词: 金属氢化物储氢; 叶脉结构翅片; 强化传热; 储氢工况参数

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1148

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 04-1196-09

Synergistic optimization of heat transfer and performance in hydrogen storage reactors using leaf-vein-inspired fin structures

ZHAO Hongpeng^{1,2}, HU Bizhou¹, LI Dongyao², SU Haoxiang¹, LAN Jingrui¹, LI Haoran¹,
HONG Wenpeng¹

(¹School of Energy and Power Engineering, Northeast Electric Power University, Changchun 132012, Jilin, China; ²Northeast Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Changchun 130000, Jilin, China)

Abstract: To investigate heat transfer limitations in metal hydride hydrogen storage systems, numerical simulations were conducted on leaf-vein-inspired fin configurations and their operating parameters. Three fin structures with graded fractal complexity (Type I, II, and III) were designed with identical fin volumes. The effects of fin geometry, inlet hydrogen pressure, heat transfer fluid velocity, and heat transfer fluid temperature on the absorption process were systematically analyzed. The results indicate that the Type III fin improves temperature

收稿日期: 2025-12-22; 修改稿日期: 2026-01-15。

基金项目: 国家自然科学基金(52506179); 中国电力工程顾问集团有限公司重大科技专项(DG3-J01-2023)。

第一作者: 赵宏鹏(1982-), 男, 博士研究生, 研究方向为固态储氢, E-mail: zhaohongpeng@nepdi.net; 通信作者: 李浩然, 副教授, 研究方向为低碳能源技术, E-mail: haoran@neepu.edu.cn。

引用本文: 赵宏鹏, 胡碧洲, 李东耀, 等. 叶脉仿生翅片结构对储氢反应器传热与反应性能的协同优化[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(4): 1196-1204.

Citation: ZHAO Hongpeng, HU Bizhou, LI Dongyao, et al. Synergistic optimization of heat transfer and performance in hydrogen storage reactors using leaf-vein-inspired fin structures[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(4): 1196-1204.

uniformity within the reaction bed by increasing the effective heat transfer area and enhancing radial thermal diffusion, thereby establishing a stable radial temperature gradient. Under identical operating conditions, the Type III fin reduced the hydrogen absorption time to 670 s, which is 38.5% shorter than that of the Type I fin. This confirms that topological fin optimization synergistically enhances both heat transfer and reaction kinetics. Parameter analysis reveals the following trends: hydrogen absorption accelerates with increasing inlet pressure up to 1.0 MPa, beyond which further pressure increases yield diminishing returns; heat transfer fluid velocities above 1 m/s provide limited additional benefit, as heat transfer becomes dominated by internal conduction within the metal hydride bed; although lower heat transfer fluid temperatures enhance the thermal driving force, performance gains diminish below 296.15 K. Therefore, near-ambient temperature operation is recommended to balance absorption efficiency and cooling energy consumption. In summary, a multibranch leaf-vein-inspired fin structure combined with appropriately selected operating parameters can effectively improve heat management and hydrogen absorption performance in metal hydride reactors, providing a practical basis for the design and operation of efficient hydrogen storage systems.

Keywords: metal hydride hydrogen storage; leaf-vein structure; enhance heat transfer; hydrogen storage operating parameters

随着我国能源结构中风电、太阳能等可再生能源占有量快速增长, 可再生能源消纳能力不足和并网困难等问题愈发突出^[1]。氢气因其清洁性及热值高等特点, 成为一种重要的能源载体, 其储存被认为是解决该问题的关键^[2]。相较于气态及液态储氢, 金属氢化物储氢(metal hydride hydrogen storage, MHHS)因其稳定性好备受关注^[3], 金属氢化物反应器是金属氢化物储氢^[4]与热化学蓄热技术的核心装备^[5], 一般由金属氢化物(metal hydride, MH)反应床层和相应的热管理系统组成^[6], 具有工作压力低^[7]、体积密度高^[8]以及循环稳定性好^[9]等特点。在同等压力水平下, 高温条件^[10]不利于吸氢反应进行; 低温条件不利于放氢反应进行^[11]。因此, 基于已有的动力学参数, 探究金属氢化物储氢技术的吸放氢动力学行为及热质传递特性, 通过优化热管理方案与工况参数, 实现储氢动力学性能的提升, 对改善储氢技术具有重要意义^[12]。

使用翅片会使反应器内温度均匀分布, 从而有效提高传热性能^[13]。已有研究表明, 较大的翅片直径和较多的翅片数量能有效增加传热比表面积, 从而提高传热效率^[14]。Krishna等^[15]引入了基于逆向工程技术的新翅片优化MHHS。进一步证明, 合理的翅片数量对传热有明显促进作用, 而精确的径向维

度对传热性能的影响不大。但仅使用内部翅片会增加MHHS反应器的重量, 基于此, Ma等^[16]将翅片与反应器内部冷却管相结合, 在提高传热性能的同时减轻了MHHS反应器的质量。此外, Gao等^[17]在反应器内部设置多个内部冷却管并与翅片结合, 使储氢效率进一步提高。这些研究共同表明, 与翅片半径和厚度相比, 翅片数是影响氢吸收率的关键参数。

植物叶脉经过数百万年的进化, 已经发展出高效的物质和能量运输网络^[18], 为储氢罐中的能量分配和管理提供了有效措施。Bai等^[19]设计了一种中心冷却管耦合树形仿生翅片的新颖方案, 相较于普通径向翅片, 可将吸氢时间减少20.7%。Huang等^[20]对树形微通道散热器与传统光滑微通道散热器的综合性能进行了数值比较, 发现树形微通道散热器表现出较好的综合性能。Krishna等^[21]设计了一种配备了仿生叶脉翅片的新型MH反应器。研究发现, 具有窄梯形通道设计的反应器表现出优异的传热性能。由此可知, 复杂的翅片使MH床中温度分布的均匀性得到改善, 提高了传热性能, 可有效提高储氢速率。因此, 将翅片换热器与传热流体(heat transfer fluid, HTF)换热器相结合, 能显著提高反应器内传热性能。此外, 大多数研究仅考虑

基于翅片和HTF管的组合对传热和吸氢过程的改善,仿生叶脉翅片结构参数影响储氢速率的动力学机制仍需要进一步完善。

现有研究表明,仿生叶脉结构能有效改善反应器内的传热性能并提升储氢速率,但多局限于对特定构型的性能验证或复杂度的简单增加,关于此类结构内部温度场与浓度场的动态演化对储氢动力学过程的影响阐述较少。此外,结构复杂度的提升往往以增大翅片体积占比为代价,这会在一定程度上牺牲储氢合金的填充量^[22],从而削弱其在实际应用中的体积储氢密度优势。同时,研究大多局限于结构本身的传热分析,对关键操作参数(如压力、传热流体流速与温度)的影响规律探讨不足。为此,本研究基于叶脉分形特征,设计并比较了3种体积相同的不同复杂度的翅片结构(I型基础型、II型二级分支型、III型复杂分支型),重点研究其对反应器内温度分布均匀性与局部热积聚的调控作用。通过系统分析压力、HTF流速与温度等参数的影响,揭示其与翅片结构协同作用下的储氢性能变化规律,以期为高性能MHHS反应器的设计与优化提供理论依据。

1 金属氢化物反应器仿真模型

1.1 模型尺寸

将仿生叶脉翅片集成到MH反应器中,以提高反应器的传热能力。其具体形状及尺寸如图1所示。该反应器为圆柱形壳体,LaNi₅金属合金粉末填充其内部,反应器半径 $r_2=25$ mm、高 $z=60$ mm,中心为半径 $r_1=5$ mm的换热管。反应器顶部为氢气入口,入口压强为0.8 MPa;底部为HTF入口,温度为293.15 K,HTF流速设为1 m/s。

I型、II型、III型翅片的设计结构如图2所示。I型无分支,为基础结构;II型为二级分支结构;III型为复杂分支结构。所有翅片的体积均为 $1.2012 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ 。

不同翅片的具体尺寸如表1所示。其中, H 为翅片主脉长度, H_1 、 H_2 与 H_3 为翅片支脉长度, w 、 w_1 与 w_2 为翅片厚度, A 与 B 均为角度。

1.2 控制方程

MHHS是指气态氢在一定条件下与金属反应生成MH,从而将氢气变为固态氢储存起来的过程。

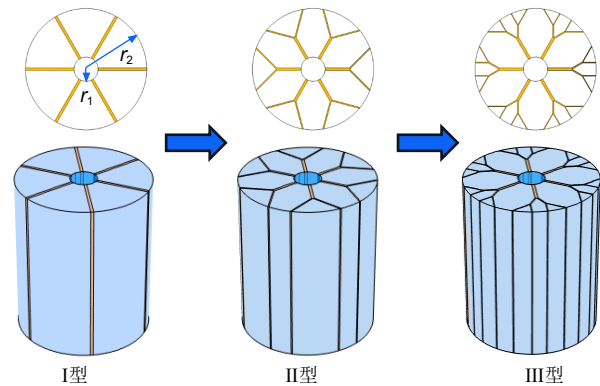


图1 MH反应器结构

Fig. 1 Structure of the metal hydride reactor

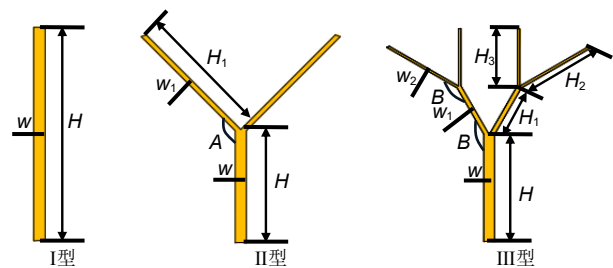


图2 I型、II型、III型翅片形状及控制参数

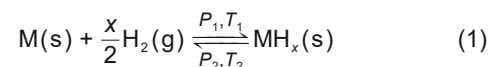
Fig. 2 Shape and control parameters of type I, II, and III fins

表1 翅片几何参数

Table 1 Parameters of the fins

类型	H/mm	w/mm	H_1/mm	H_2/mm	H_3/mm	w_1/mm	w_2/mm	$A/(\text{°})$	$B/(\text{°})$
I	20.02	1	—	—	—	—	—	—	—
II	10.01	1	11.86	—	—	0.42	—	135	—
III	10.01	1	5	7.57	5.31	0.42	0.22	—	150

式(1)全面阐述了储氢合金在储存和释放氢气过程中的各相变化。



式中, M 代表储氢合金; MH_x 代表生成的MH,氢气的固态储存形式。在特定条件下(P_1 、 T_1),氢气由气态转变为固态储存在MH中,释放热量($\Delta H > 0$)。在 P_2 、 T_2 条件下,氢气由固态转为气态,从MH中释放,吸热($\Delta H < 0$)。储氢金属对氢气的吸收和释放是可逆的。在不改变初始条件且无外力干预的情况下,随着时间推移,氢气吸收和释放达到动态平衡,系统保持稳定状态。为了建立MH吸氢过程仿真模型,提出如下假设:氢气被认为是理想气体、MH的热物理性质各向同性且孔隙均匀、忽略热对

流和热辐射及MH床的体积膨胀、气态和固态之间存在热平衡。反应器仿真模型物性参数见表2。

表2 反应器仿真模型物性参数^[23]

参数	符号	数值
吸附活化能	E_a /(J/mol)	21179.6
吸附速率常数	C_a /s ⁻¹	59.187
合金初始密度	ρ_{emp} /(kg/m ³)	7164
合金吸氢饱和密度	ρ_{sat} /(kg/m ³)	7259
渗透率	κ /(m ²)	10 ⁻⁸
孔隙率	ε	0.5
焓值	ΔH /(J/mol)	30800
熵值	ΔS /(J/kg)	108
氢气比热容	c_{pg} /(J/(kg·K))	14890
合金比热容	c_{ps} /(J/(kg·K))	419
理想气体常数	R_g /(J/(mol·K))	8.314
氢气摩尔质量	M_g /(J/(mol·K))	2.0159×10 ⁻⁴
合金热导率	k_s /(W/(m·K))	2.4
氢气热导率	k_g /(W/(m·K))	0.1815

MH反应器内氢气的质量平衡方程为式(2)。

$$\varepsilon \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \mathbf{u}) = -m \quad (2)$$

式中， ε 为MH的孔隙率； ρ_g 为氢气的密度； t 为时间； \mathbf{u} 为MH床内氢气的流速； m 为单位时间与体积内的吸氢质量。

氢气被视为理想气体，则 ρ_g 计算方法见式(3)。

$$\rho_g = \frac{M_g P_g}{R_g T_g} \quad (3)$$

式中， M_g 为氢气摩尔质量； P_g 为氢气压力； R_g 为理想气体常数； T_g 为氢气温度。

在多孔介质MH床内，氢气流速通过达西定律描述，见式(4)。

$$\mathbf{u} = -\frac{\kappa}{\mu_g} \Delta P \quad (4)$$

式中， κ 为渗透率； μ_g 为动力黏度； ΔP 为压力差。

MH反应床的质量守恒方程为式(5)。

$$(1 - \varepsilon) \frac{\partial \rho_s}{\partial t} = m \quad (5)$$

式中， ρ_s 为金属合金的密度； m 可通过式(6)计算。

$$m = C_a \exp\left(-\frac{E_a}{R_g T}\right) \ln\left(\frac{P}{P_{eq}}\right) (\rho_{sat} - \rho_s) \quad (6)$$

式中， C_a 为吸附速率常数； E_a 为吸附活化能； T 为MH反应床层温度； ρ_{sat} 为储氢合金饱和密度； P_{eq} 为平衡压强，由式(7)求解。

$$\ln P_{eq} = \frac{\Delta H}{R_g T} - \frac{\Delta S}{R_g} \quad (7)$$

式中， ΔH 为焓变值； ΔS 为熵变值

气体和固体之间存在热平衡，能量平衡方程由式(8)给出。

$$(\rho c_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c_p)_g (\mathbf{u} \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + m \frac{\Delta H}{M_g} \quad (8)$$

式中， c_p 与 k 分别为比热容和热导率，有效比热 $(\rho c_p)_{eff}$ 与有效热导率 k_{eff} 由式(9)、式(10)计算。

$$(\rho c_p)_{eff} = (1 - \varepsilon) (\rho c_p)_s + \varepsilon (\rho c_p)_g \quad (9)$$

$$k_{eff} = (1 - \varepsilon) k_s + \varepsilon k_g \quad (10)$$

式中， $(\rho c_p)_s$ 、 k_s 分别为金属合金比热容与热导率， $(\rho c_p)_g$ 、 k_g 分别为氢气比热容与热导率。

MH储氢系统的储氢量以质量分数表示，其计算方法见式(11)。其中， ρ_{emp} 是无氢时合金密度。

$$w = \frac{(\rho_s - \rho_{emp})}{\rho_{emp}} \times 100\% \quad (11)$$

1.3 模型验证

为验证本研究所建立数值模型的可靠性，首先构建了一个与Jemni等^[24]的研究实验条件一致的仿真模型。该模型为半径25 mm、高60 mm的圆柱形反应器，内部填充相同物性参数的储氢合金，并设定相同的初始与边界条件：入口氢压为0.8 MPa，外壁面由恒温水浴控制为293.15 K。通过对比仿真与实验数据对模型进行验证。图3(a)展示了在反应器径向位置 $r=15$ mm、轴向高度 $z=35$ mm处，储氢过程中MH床层温度随时间演变的曲线。仿真结果与实验数据吻合良好，证实了本模型能够准确描述该体系的传热与反应过程。为确保模拟结果不受网格数量的影响，在保持其他条件不变的情况下，选取几何结构最复杂的III型(复杂分支型)翅片反应器进行网格独立性验证。研究分别采用了34469、146698、229681及302252共4种网格数量进行模拟计算。图3(b)结果显示，当网格数量达到146698后，吸氢完成时间已趋于稳定。基于此，本研究所所有后续模拟均采用不低于146689的网格数量进行划分，以确保计算结果的准确性不受网格密度影响。

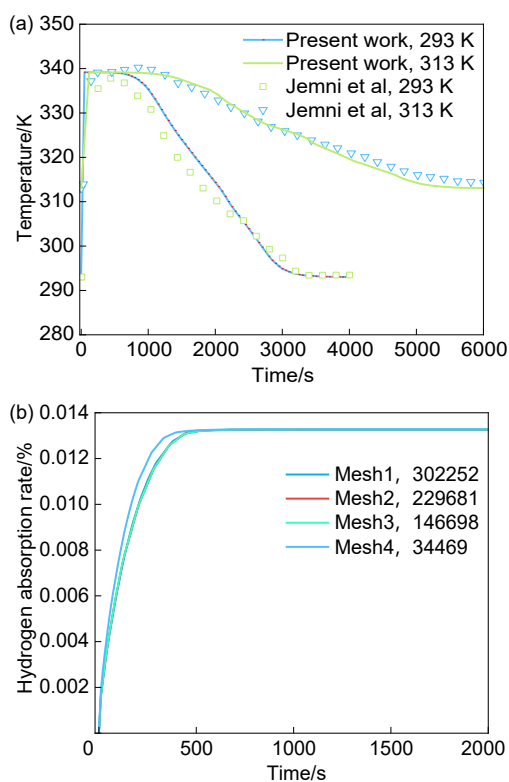


图3 模型有效性验证 (a) 实验对比; (b) 网格无关性
Fig. 3 Model validation (a) experimental comparison; (b) grid independence

2 结果与讨论

2.1 翅片设计比较

在入口压力为 0.8 MPa、HTF 流速及温度为 1 m/s 及 293.15 K 的条件下, 对 I 型、II 型和 III 型叶脉仿生翅片反应器内吸氢过程进行对比研究。图 4 揭示了 3 种翅片的性能差异。III 型翅片反应器在 670 s 内完成吸氢, 相比 I 型翅片的 1090 s, 反应时间缩短了 38.5%。这一现象的根本原因在于仿生分形结构对反应器内热量传递路径的优化。反应初期因 LaNi_5 合金吸氢放热, 床层温度以极短时间从 293.15 K 骤升至峰值。随着时间推移, III 型翅片凭借其复杂的多级分支网络, 在相同体积下提供了更大的有效传热面积, 将热量迅速带出, 促进了吸氢反应进行。

选取反应器内 $z=0.03$ m 截面, 3 种翅片温度分布如图 5 所示。反应器中心及翅片附近温度显著低于其他区域, 这是由换热管及高导热性翅片共同作用导致的, 在 300 s 时, I 型翅片平均温度明显低于 II 型和 III 型翅片。这是由于另外两种翅片分支多,

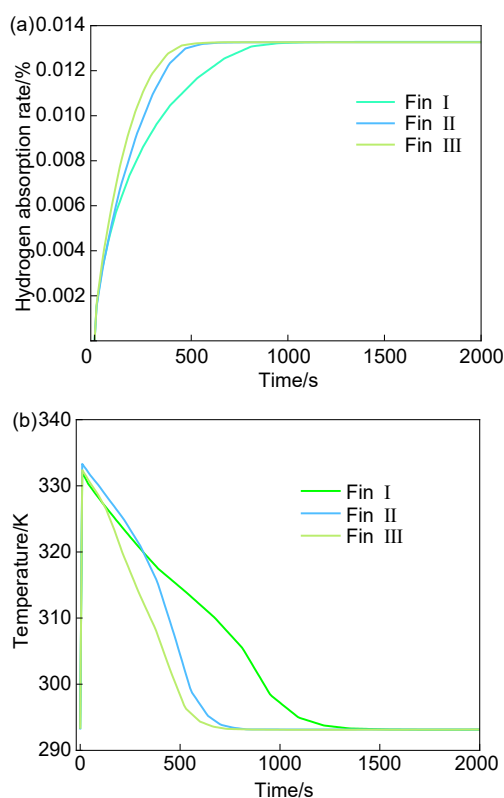


图4 不同翅脉结构下反应器的吸氢率 (a)、平均温度 (b)
Fig. 4 Reactor performance with different fin structures hydrogen absorption rate (a), average temperature (b)

比表面积大, 需要更长的时间在换热管和翅片之间传递热量。也就是说, 热量通过铜翅片从 MH 床传递到 HTF 管的速度快于仅在 MH 床传递的速度。还可看出, I 型翅片中反应器外壁周围大部分区域的 MH 床温度仍然较高。同样, 与 III 型翅片相比, II 型翅片的大多数外部区域仍然具有更高的温度。这种差异印证了翅片比表面积与热传导阻力的反相关性, 也就是说翅片比表面积越大, MH 床的热传导阻力越小, 从而使 MH 床温度分布更均匀。在 500 s 时观察到温度差异继续扩大。在 I 型翅片外部区域仍观察到较高的温度。III 型翅片已实现整体均匀且更低的温度分布, 这种热管理效能的差异直接影响了储氢动力学性能。III 型翅片凭借其最大的比表面积, 在反应器内部形成了最优的传热路径。

图 6 中的吸氢浓度分布进一步验证了该结论, 通过对比图 5 可明显看出, 由于 HTF 和翅片区域周围温度较低, 氢浓度普遍高于其他区域。特别是 III 型翅片的外部区域, 因其复杂分支结构, 始终维持更高的氢浓度水平。在 300 s 时氢浓度分布呈现显

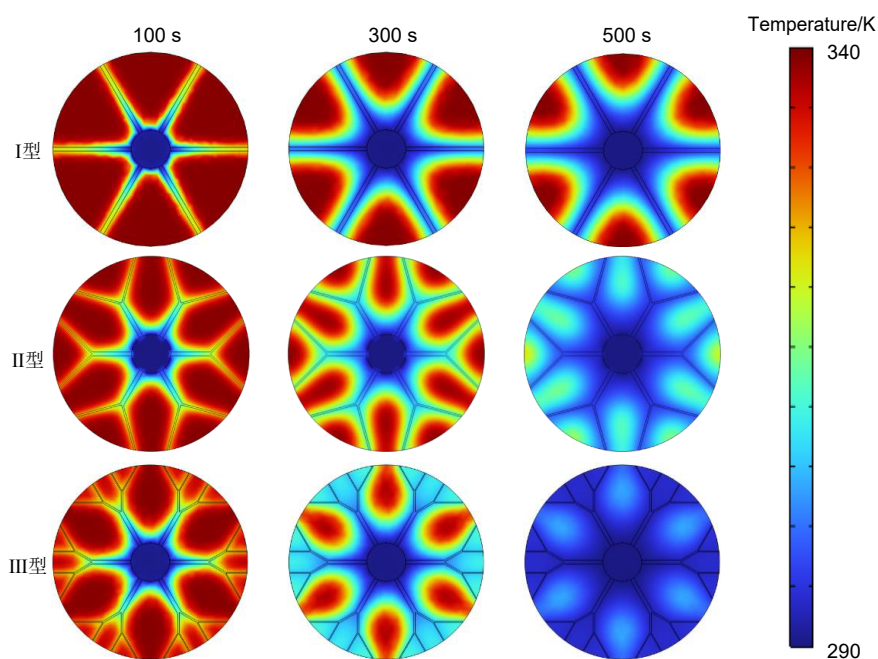


图5 MH反应器温度分布

Fig. 5 Metal hydride reactor temperature distribution

著差异，I型翅片反应器外部区域的氢浓度明显偏低。这一现象与温度对氢吸附的抑制作用密切相关，当反应器内局部温度过高时，会阻碍氢气吸附过程。因此，温度消散速率与氢动力学反应速率为正相关性，即散热越快，吸氢速率越大。翅片的高比表面积和优良导热特性共同促成了温度的快速均

匀化与降低，相较于I型、II型翅片结构，在本研究中，分支结构最复杂的III型翅片展现出最优的综合性能。

2.2 工作参数研究

为系统探究氢气吸附过程的动力学特性，本研究基于结构优化后的III型翅片反应器，针对不同工

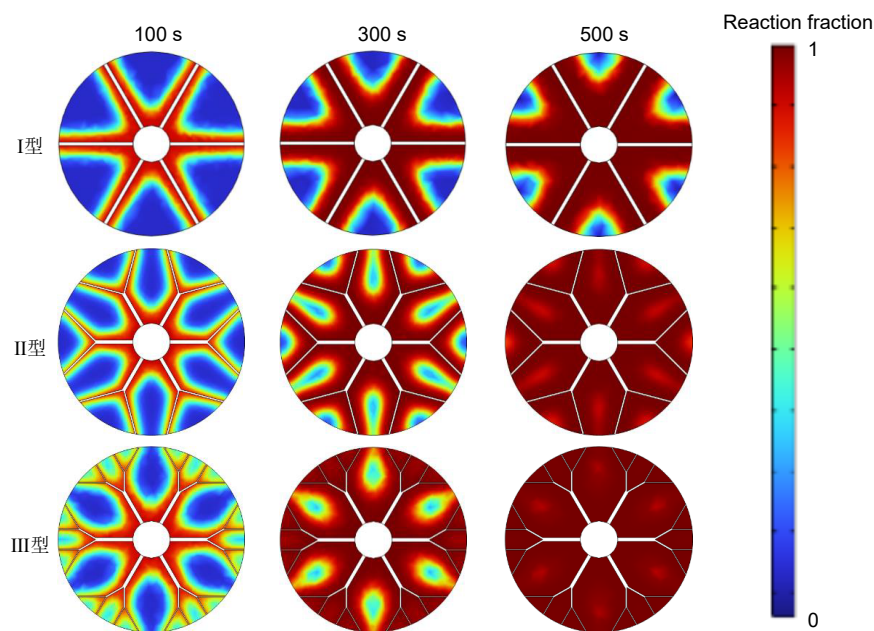


图6 MH反应器氢浓度分布图

Fig. 6 Metal hydride reactor hydrogen concentration distribution

况参数对储氢过程的影响规律进行了深入研究。

为明确入口压力对储氢性能的影响并揭示其与反应动力学的内在关联,在HTF温度与流速分别为293.15 K及1 m/s的条件下,对0.6 MPa、0.8 MPa、1.0 MPa、1.2 MPa及1.4 MPa共5个入口压力工况进行了仿真模拟。如图7所示,当入口压力从0.6 MPa以0.2 MPa的间隔升至1.4 MPa时,吸氢反应速率相应提升,系统完成吸氢所需时间依次为840 s、670 s、570 s、510s和450 s。入口压力升高提升了反应驱动力,升压阶段吸氢反应加剧,释放更多反应热,导致系统平均温度升高,增大了与HTF之间的温差,进而增强了传热与反应的热力学推动力。同时,压力提升直接加速了反应动力学进程,符合氢化物吸氢过程对压力依赖的基本规律。进一步分析时间降幅可知,入口压力从0.6 MPa增至0.8 MPa时,储氢完成时间缩短170 s,从0.8 MPa增至1.0 MPa时,缩短100 s,但当入口压力从1.0 MPa继续增至1.2 MPa及1.4 MPa时,每增加0.2 MPa所对应的储氢缩短时间均稳定在60 s。这表明,当入口压力超过1.0 MPa后,压力升高对反应速率的促进效应进入一个稳定阶段。该现象主要源于储氢反应放热特性与系统有限散热能力之间的矛盾,压力过高时,反应热积累加剧,局部温升过高反而会抑制氢化反应的进行。从工程实际角度来看,压力升高也会加剧材料氢脆风险,对系统长期安全性构成威胁。因此,入口压力的选择应在适当范围内控制。

为探究HTF流速对储氢性能的影响机制,在入口压力为0.8 MPa、HTF温度为293.15 K的条件下,选取0.2 m/s、1.0 m/s、5.0 m/s共3种不同流速进行探究,以揭示流速参数与热传递特性之间的动态平衡关系。如图8所示,当流速从0.2 m/s升至1.0 m/s时,储氢时间由690 s缩至670 s,流速提高增强了流体与反应器壁面之间的对流传热,从而更有效地移走反应热,有利于维持反应区与换热界面之间的温度梯度,为吸氢反应提供了稳定的热力学驱动力。然而,当流速继续升至5.0 m/s时,吸氢时间仍为670 s,未见进一步缩短,同时反应器内部温度分布亦未出现明显变化。这表明本工况下在流速达到1.0 m/s后,继续提升流速对系统整体储氢性能的改善作用已趋于饱和。这反映了在较低流速阶段,系统传热主要受对流传热控制,提升

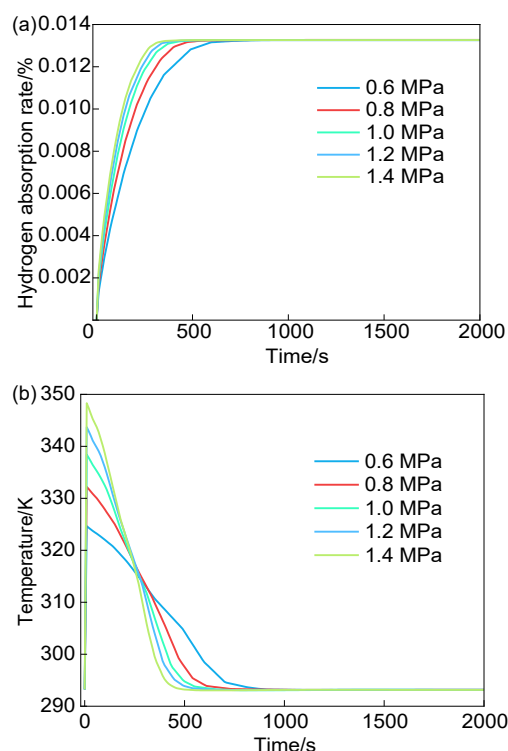


图7 不同入口压力下的吸氢率 (a)、平均温度 (b)

Fig. 7 Different inlet pressures hydrogen absorption rate (a), average temperature (b)

流速可直接强化传热;而当流速过高时,系统传热所限制逐渐由对流传热转为反应器内部的热传导过程。此时,热量从反应核心向壁面传递的速度受材料导热性能限制,仅靠提高外部流体流速已无法进一步加速整体热传递。

为了探究HTF温度对储氢性能的影响,揭示温度参数与传热驱动力之间的内在规律。在入口压力为0.8 MPa、HTF流速为1.0 m/s的条件下,选取290.15 K、293.15 K、296.15 K、299.15 K、302.15 K共5种温度进行探究。如图9所示,当HTF温度从302.15 K以3 K的间隔降至290.15 K时,储氢完成时间相应缩短,分别为820 s、750 s、700 s、670 s和640 s。吸氢率随HTF温度降低而单调提高,这是因为较低的HTF温度增大了其与反应器内部之间的温差,从而增强了传热驱动力,有利于反应热的及时移出,促进了吸氢反应进行。当HTF温度分别从296.15 K降至293.15 K及从293.15 K降至290.15 K时,储氢时间均缩短30 s。这说明在此工况下,进一步降低HTF温度虽仍可提升吸氢速率,但提升幅度已逐渐稳定。考虑到将HTF温度降至更低水平需要额外的冷却能耗,

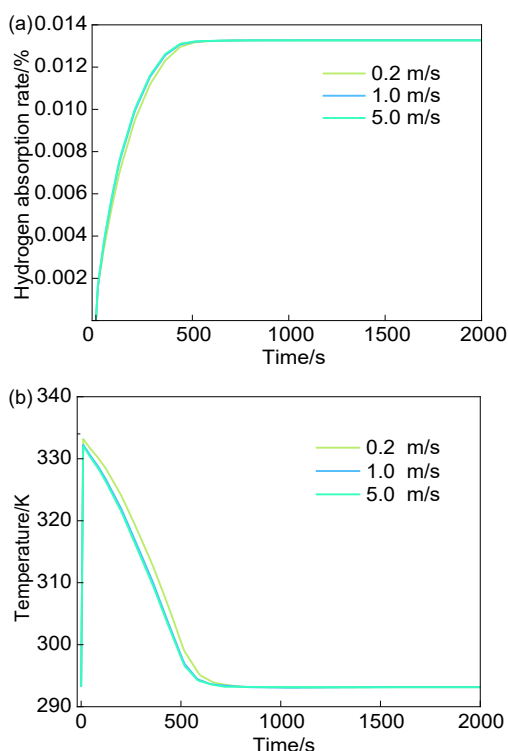


图8 不同HTF速度下的吸氢率(a)、平均温度(b)
Fig. 8 Different HTF flow velocities hydrogen absorption rate (a), average temperature (b)

从系统能效角度出发, 本工况下的HTF温度宜选择接近室温的温度。这可在保证较好储氢率的同时, 避免不必要的冷却能耗。

综上所述, 本研究通过单因素分析, 明确了入口压力、HTF流速与温度等关键参数对储氢性能的独立影响规律, 为反应器关键参数范围的确定提供了依据。需要指出的是, 实际储氢系统中各参数间存在复杂的交互作用, 而全面系统优化需要建立在多参数耦合分析的基础上。因此, 在未来工作中, 将基于本研究所揭示的影响规律, 进一步开展多参数协同优化研究, 通过系统优化方法, 寻求反应器在真实运行条件下的全局最优工况, 从而推动MHHS技术向更高性能与更强工程适用性发展。

3 结论

(1) III型翅片通过增大比表面积显著提升传热能力, 在相同工况下670 s完成吸氢反应, 较I型翅片的反应时间缩短38.5%, 证实比表面积的增加能有效强化MH反应器的传热效率。

(2) 具有多级分支特征的III型翅片通过增强径

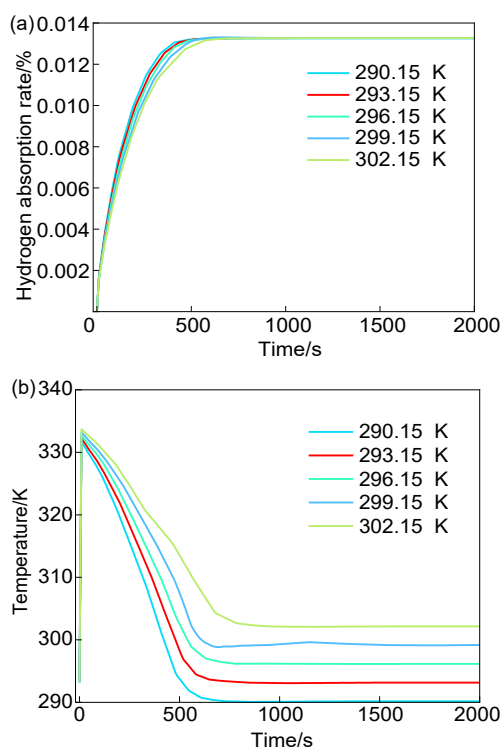


图9 不同HTF温度下的吸氢率(a)、平均温度(b)
Fig. 9 Different HTF flow temperatures hydrogen absorption rate (a), average temperature (b)

向热扩散能力, 使反应器内温度分布更加均匀, 形成稳定的径向温度梯度, 为吸氢反应提供持续的热力学驱动力。

(3) 吸氢速率随入口压力升高而提升, 且在压力超过1.0 MPa后提升作用趋于稳定; HTF流速大于1.0 m/s后, 继续提高流速对吸氢速率的改善效果逐渐饱和; 在兼顾反应性能与系统能耗的前提下, HTF温度宜选择为接近室温。

参考文献

- [1] 霍现旭, 王靖, 蒋菱, 等. 氢储能系统关键技术及应用综述[J]. 储能科学与技术, 2016, 5(2): 197-203. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4239.2016.02.011.
HUO X X, WANG J, JIANG L, et al. Review on key technologies and applications of hydrogen energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2016, 5(2): 197-203. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4239.2016.02.011.
- [2] KLOPČIČ N, GRIMMER I, WINKLER F, et al. A review on metal hydride materials for hydrogen storage[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 72: 108456. DOI:10.1016/j.est.2023.108456.
- [3] 袁思哲, 刘宇豪, 赵长颖. 钛系金属氢化物储氢反应器的设计和吸放氢过程数值研究[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(10): 3955-3967.
YUAN S Z, LIU Y H, ZHAO C Y. Designing a titanium-based

- hydride hydrogen storage reactor and numerical simulation of the hydrogen absorption and desorption process[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(10): 3955-3967.
- [4] 李璐伶, 樊栓狮, 陈秋雄, 等. 储氢技术研究现状及展望[J]. *储能科学与技术*, 2018, 7(4): 586-594. DOI: 10.12028/j.issn.2095-4239.2018.0062.
LI L L, FAN S S, CHEN Q X, et al. Hydrogen storage technology: Current status and prospects[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2018, 7(4): 586-594. DOI: 10.12028/j.issn.2095-4239.2018.0062.
- [5] 李建, 张立新, 李瑞懿, 等. 高压储氢容器研究进展[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(5): 1835-1844. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0309.
LI J, ZHANG L X, LI R Y, et al. High-pressure gaseous hydrogen storage vessels: Current status and prospects[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(5): 1835-1844. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0309.
- [6] 应强, 李建立, 段秉言, 等. 金属氢化物储放氢反应器研究进展[J]. *北京石油化工学院学报*, 2023, 31(4): 12-21.
YING Q, LI J L, DUAN B Y, et al. Recent developments in metal hydride hydrogen storage and desorption reactor[J]. *Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology*, 2023, 31(4): 12-21.
- [7] KHAN H B, ZHANG T L. Metal hydride hydrogen storage risk assessment: A review[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 129: 117273. DOI: 10.1016/j.est.2025.117273.
- [8] 王为术, 张向薪, 姚紫琨, 等. MgH_2 反应器储氢反应速度特性[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(5): 1543-1550. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0575.
WANG W S, ZHANG X X, YAO Z K, et al. Study on reaction rate characteristics of hydrogen storage in MgH_2 reactor[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(5): 1543-1550. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0575.
- [9] KAMRAN M, TURZYŃSKI M. Exploring hydrogen energy systems: A comprehensive review of technologies, applications, prevailing trends, and associated challenges[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 96: 112601. DOI: 10.1016/j.est.2024.112601.
- [10] CHENG Y, WEI G S, MA J J, et al. Hydrogen absorption and desorption performance study on metal hydride reactor based on phase change material[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 105: 1092-1102. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.01.355.
- [11] PAUL A R, MEHLA S, BHARGAVA S. Intermetallic compounds for hydrogen storage: Current status and future perspectives[J]. *Small*, 2025, 21(14): 2408889. DOI: 10.1002/sml.202408889.
- [12] ZHAO W L, YANG Y, BAO Z W, et al. Methods for measuring the effective thermal conductivity of metal hydride beds: A review[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(11): 6680-6700. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.185.
- [13] MUTHUKUMAR P, SINGHAL A, BANSAL G K. Thermal modeling and performance analysis of industrial-scale metal hydride based hydrogen storage container[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(19): 14351-14364. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.07.010.
- [14] KESHARI V, MAIYA M P. Design and investigation of hydriding alloy based hydrogen storage reactor integrated with a pin fin tube heat exchanger[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(14): 7081-7095. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.02.100.
- [15] KRISHNA K V, KANTI P K, MAIYA M P. A novel fin efficiency concept to optimize solid state hydrogen storage reactor[J]. *Energy*, 2024, 288: 129789. DOI: 10.1016/j.energy.2023.129789.
- [16] MA J C, WANG Y Q, SHI S F, et al. Optimization of heat transfer device and analysis of heat & mass transfer on the finned multi-tubular metal hydride tank[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(25): 13583-13595. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.03.016.
- [17] GAO W, QU Z G, GAO Z, et al. Multi-step numerical method for the hydrogen storage performance optimisation of metal hydride reactors[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 133: 118000. DOI: 10.1016/j.est.2025.118000.
- [18] LIU L B, ZHANG J, ZHAO G H, et al. A lightweight bionic design for a scanner based on the 3D architecture of root system of pine trees[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2020, 62(1): 175-192. DOI: 10.1007/s00158-019-02478-2.
- [19] BAI X S, YANG W W, TANG X Y, et al. Optimization of tree-shaped fin structures towards enhanced absorption performance of metal hydride hydrogen storage device: A numerical study[J]. *Energy*, 2021, 220: 119738. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119738.
- [20] HUANG P N, DONG G P, ZHONG X N, et al. Numerical investigation of the fluid flow and heat transfer characteristics of tree-shaped microchannel heat sink with variable cross-section[J]. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2020, 147: 107769. DOI: 10.1016/j.cep.2019.107769.
- [21] KRISHNA K V, PANDEY V, MAIYA M P. Bio-inspired leaf-vein type fins for performance enhancement of metal hydride reactors[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(56): 23694-23709. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.05.163.
- [22] RAJU M, KUMAR S. Optimization of heat exchanger designs in metal hydride based hydrogen storage systems[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(3): 2767-2778. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.06.120.
- [23] TONG L, XIAO J S, BÉNARD P, et al. Thermal management of metal hydride hydrogen storage reservoir using phase change materials[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(38): 21055-21066. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.03.127.
- [24] JEMNI A, BEN NASRALLAH S, LAMLOUMI J. Experimental and theoretical study of a metal-hydrogen reactor[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1999, 24(7): 631-644. DOI: 10.1016/S0360-3199(98)00117-7.