文章编号:1674-7607(2026)01-0085-08 DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2026.240651

新型换热结构对固态储氢和燃料电池耦合系统性能的影响

张飞宇[1]， 贾岚博[1]， 王 宵[1]， 程永攀[1]， 胡友情[2]
(1. 华北电力大学 低品位能源多相流与传热北京市重点实验室，北京 102206；
2. 深圳中广核工程设计有限公司，广东深圳 518116)

摘 要：提出了一种新型螺旋盘管结构的固态储氢瓶，并将其与燃料电池组成耦合系统，建立数学模型进行分析，获得了不同换热结构下固态储氢瓶内部温度和氢气质量分数分布，并探究了燃料电池工作温度对固态储氢瓶性能的影响。结果表明：与直管和单螺旋盘管相比，双螺旋盘管具有更高的换热速率，可以显著提升固态储氢瓶的放氢速率，提高燃料电池的发电效率；提高燃料电池工作温度可以提高固态储氢瓶初始阶段的放氢速率，但对总的放氢量影响不大。

关键词：储能技术；热设计；计算传热学；固态储氢；燃料电池
中图分类号：TK91 **文献标志码**：A **学科分类号**：480.40

Influence of Novel Heat Exchange Structure on Performance of Solid-state Hydrogen Storage and Fuel Cell Coupled System

ZHANG Feiyu[1]， *JIA Lanbo*[1]， *WANG Xiao*[1]， *CHENG Yongpan*[1]， *HU Youqing*[2]
(1. Beijing Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer for Low Grade Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518116, Guangdong Province, China)

Abstract: A novel solid-state hydrogen storage cylinder with a helical coil structure was proposed, and it was integrated with a fuel cell to form a coupled system. A mathematical model was developed for analysis, and the internal temperature and hydrogen mass fraction distribution of the solid-state hydrogen storage cylinder under different heat exchange structures were obtained. Moreover, the influence of the fuel cell operating temperature on the performance of the solid-state hydrogen storage cylinder was explored. Results show that compared with straight pipes and single-helix coils, the double-helix coil has a higher heat transfer rate, which can significantly improve the hydrogen release rate of the solid-state hydrogen storage cylinder and the power generation efficiency of the fuel cell. Increasing of the fuel cell operating temperature can enhance the initial hydrogen release rate of the solid-state hydrogen storage cylinder, but has little effect on the total hydrogen release capacity.

Key words: energy storage technology; thermal design; numerical heat transfer; solid-state hydrogen storage; fuel cell

收稿日期:2024-10-24 **修订日期**:2025-01-04
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52276153)
作者简介:张飞宇(1996—)，男，河北承德人，博士研究生，研究方向为固态储氢技术。
程永攀(通信作者)，男，教授，博士，E-mail:chengyp@ncepu.edu.cn。

传统化石能源消耗量增长带来的环境污染问题日益严重，对全球生态环境造成了巨大破坏。如今世界各国都在大力发展太阳能和风能等清洁能源，而氢能作为零排放的二次能源，是有效利用清洁能源的优良载体，有望在绿色低碳转型中得到广泛的应用[1-2]。质子交换膜(PEM)燃料电池因具有氢能转化效率高、可靠性高、无污染等优点而被广泛应用，其运行过程中会产生大量余热[3-4]，占氢气总能量的 45%～60%[5]，需要进行有效冷却。固态储氢具有放氢压力低、可靠性和安全性高等特点，适合氢能的大规模推广和灵活应用。但是，固态储氢材料在释放氢气过程中需吸收热量，因此将 PEM 燃料电池与固态储氢瓶相互耦合[6]，将燃料电池的余热传递到固态储氢瓶中，既实现了燃料电池的冷却，又保证了固态储氢材料放氢所需的热量，从而能够提高能量利用效率，保持系统高效稳定运行。

国内外学者在燃料电池与固态储氢耦合方面已开展了初步的研究。Khaitan 等[7]在研究小型风电氢储能应用时通过冷却水将燃料电池与固态储氢系统进行了耦合，发现该方法可以有效降低燃料电池散热负荷，提高能量效率，但所采用的简化一维模型不足以反映实际工况。Weiss-Ungethüm 等[8]针对高温燃料电池和 $NaAlH_4$ 固态储氢系统，设计了缠绕在储氢管外的液冷换热装置，但理论和机理分析部分尚不深入，同时由于系统温度远高于环境温度，保温不足导致散热损失较大，因此实验结果对实际应用的指导意义有限。Rizzi 等[9]设计了一种固态储氢和燃料电池耦合的系统，储氢瓶采用水浴套管与燃料电池进行耦合，但仅针对固态储氢瓶放氢和系统功率进行了结果分析，并未对热耦合过程进行更深入的研究。Tetuko 等[10]建立了 PEM 燃料电池与固态储氢瓶之间通过热管进行热耦合的数学模型，并发现储氢瓶供应燃料电池运行的氢气需吸收的热量仅占燃料电池余热总量的约 30%，但对于何种结构能进一步增强换热效果没有进行深入研究。Omrani 等[11]研究了阴极开放式 PEM 燃料电池和固态储氢系统，采用阴极排出的热风直接加热固态储氢瓶，实验结果表明该方式可有效增加放氢速率和系统稳定运行时间，但并未在换热布局、传热机理等方面进行进一步探究。Yao 等[12]针对固态储氢瓶内部传热进行了模拟，但只采用了简单的换热模型，并未对换热结构进行探讨。

固态储氢材料导热系数较低，为保证氢气有效释放，需强化固态储氢瓶内的换热。目前，换热模型主要采用集总参数模型或其他简化模型进行分析，且未和燃料电池的化学反应、传热模型进行耦合。本文针对固态储氢与燃料电池耦合系统建立数学模型，同时建立固态储氢瓶内全场的传热传质与流动模型。在此基础上，提出了新型双螺旋盘管结构的固态储氢瓶，获得了固态储氢瓶内温度、压力、放氢速率和吸热量变化曲线，阐释了双螺旋盘管结构增强储氢瓶中氢气脱附的机理，分析了关键参数对固态储氢和燃料电池耦合系统性能的影响规律。

1 物理模型

如图 1 所示，本文研究的系统由 PEM 燃料电池、固态储氢瓶、冷却装置、水箱等构成。固态储氢瓶为燃料电池提供氢气，冷却水流经燃料电池带走多余热量，通过双螺旋盘管将余热传递给固态储氢瓶，为氢气脱附提供所需热量，剩余的热量通过冷却装置散失到环境中。

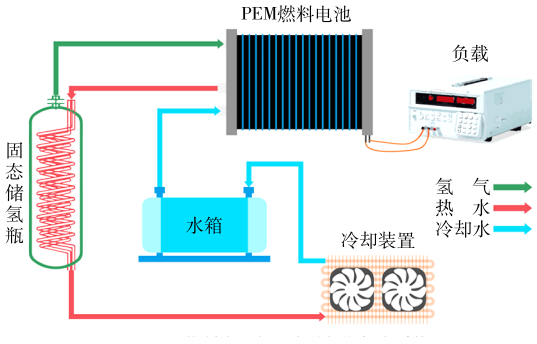


图 1 PEM 燃料电池与固态储氢瓶耦合系统

Fig. 1 Coupled system of PEM fuel cell and solid-state hydrogen storage cylinder

1.1 燃料电池模型

1.1.1 阳极模块

氢气在燃料电池阳极失去电子变成 H^+，穿过质子交换膜后到达阴极与 O_2 发生反应生成 H_2O，在反应过程中形成稳定的电流，释放热量。

燃料电池的阳极[13]中，根据质量守恒，氢气的流量变化可表示为

$$\frac{\mathrm{d}m_{\mathrm{H_2,an}}}{\mathrm{d}t}=q_{m,\mathrm{H_2,in}}-q_{m,\mathrm{H_2,out}}-q_{m,\mathrm{H_2,reactd}} \tag{1}$$

式中：$m_{\mathrm{H_2,an}}$ 为阳极控制体内氢气的质量；$q_{m,\mathrm{H_2,in}}$ 为进入阳极控制体的氢气质量流量；$q_{m,\mathrm{H_2,out}}$ 为流出阳极控制体的氢气质量流量；$q_{m,\mathrm{H_2,reactd}}$ 为参加反应的氢气质量流量；t 为时间。

阳极流道内能量守恒方程为

$$\frac{\mathrm{d}(c_{p,\mathrm{H_2}}m_{\mathrm{H_2,an}}T_{\mathrm{an}})}{\mathrm{d}t}=q_{m,\mathrm{H_2,in}}c_{p,\mathrm{H_2}}(T_{\mathrm{in}}-T_0)-q_{m,\mathrm{H_2,out}}c_{p,\mathrm{H_2}}(T_{\mathrm{an}}-T_0)-q_{m,\mathrm{H_2,reacted}}c_{p,\mathrm{H_2}}(T_{\mathrm{an}}-T_0)-\kappa_{\mathrm{conv,an}}(T_{\mathrm{st}}-T_{\mathrm{an}}) \tag{2}$$

式中：c_{p,H_2} 为氢气比定压热容；$\kappa_{conv,an}$ 为燃料电池堆与阳极控制体之间的传热系数；T_{an} 为阳极流道内气体温度；T_{in} 为阳极进气温度；T_0 为参考温度；T_{st} 为电堆的温度。

1.1.2　电化学模型

单电池的实际输出电压 V_{cell} 可通过理想电压和极化损失电压得出[14]。

$$V_{cell}=E_{ner}-V_{act}-V_{ohm}-V_{con} \tag{3}$$

式中：E_{ner} 为热力学电动势；V_{act} 为活化过电压；V_{ohm} 为欧姆过电压；V_{con} 为浓差过电压。

电堆的实际输出电压 V_{st} 为

$$V_{st}=NV_{cell} \tag{4}$$

式中：N 为电堆的单电池串联数量。

由活化极化导致的电压降 V_{act}[15-16] 为

$$V_{act}=\xi_1+\xi_2 T+\xi_3\ln(c_{O_2})+\xi_4 T\ln\rho_i \tag{5}$$

$$c_{O_2}=p_{O_2}\times 1.97\times 10^{-7}\times e^{\frac{498}{T}} \tag{6}$$

式中：c_{O_2} 为氧气浓度；p_{O_2} 为氧气压力；ρ_i 为电池电流密度；T 为温度；ξ_1、ξ_2、ξ_3、ξ_4 为经验参数。

文献[15]中通过对实验数据进行拟合，获得各经验参数：$\xi_1=-0.951\ 4$，$\xi_2=0.003\ 12$，$\xi_3=7.4\times 10^{-5}$，$\xi_4=-1.87\times 10^{-4}$。

欧姆过电压[16-17] 为

$$V_{ohm}=\rho_i\rho_\Omega\tau_m \tag{7}$$

$$\rho_\Omega=\frac{181.6\left[1+0.03\rho_i+0.062\left(\frac{T}{303}\right)^2\rho_i^{2.5}\right]}{\left\{\lambda-0.634-3\rho_i\exp\left[4.18\left(\frac{T-303}{T}\right)\right]\right\}} \tag{8}$$

式中：τ_m 为膜厚度；ρ_Ω 为膜电阻率；λ 为膜含水量。

浓差过电压[17] 为

$$V_{con}=B\ln\left(1-\frac{\rho_i}{j_{max}}\right) \tag{9}$$

式中：j_{max} 为最大电流密度，1.6 A/cm^2；B 为经验参数，取值为 −0.016。

电堆输出功率 P_{stack} 为

$$P_{stack}=NV_{cell}I \tag{10}$$

式中：I 为输出电流。

燃料电池分析模型关键参数如表 1 所示。

表 1　燃料电池模型参数

Tab. 1　Parameters for fuel cell model

参数	数值
电堆功率 P/kW	5
串联数量 N	50
活化面积 A/cm^2	232
质子膜厚度 τ_m/μm	178
氧气分压 p_{O_2}/Pa	6×10^4
膜含水量 λ	14

1.2　固态储氢模型

固态储氢能量守恒方程[18] 为

$$(\rho c_p)_{eff}\frac{\partial T}{\partial t}+\rho_g c_{p,g}u\cdot\nabla T=$$

$$\nabla\cdot(\lambda_{eff}\nabla T)+\dot{m}[\Delta h+T(c_{p,g}-c_{p,s})]+Q_{MH} \tag{11}$$

式中：ρ_g 为氢气密度；u 为氢气流速；$c_{p,g}$、$c_{p,s}$ 分别为氢气和固态储氢材料的比定压热容；λ_{eff} 为有效导热系数；$\dot{m}$ 为氢气反应的质量速率；Δh 为单位质量氢气反应热；Q_{MH} 为储氢材料吸收的热量；$(\rho c_p)_{eff}$ 为储氢材料床层的有效热容。

储氢材料吸氢速率 $\dot{m}_a$ 和放氢速率 $\dot{m}_d$ 分别为

$$\dot{m}_d=C_d\exp\left(-\frac{E_d}{RT}\right)\frac{p_g-p_{eqd}}{p_{eqd}}(\rho_s-\rho_{emp}) \tag{12}$$

$$\dot{m}_a=C_a\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)\frac{p_g}{p_{eqa}}(\rho_{sat}-\rho_s) \tag{13}$$

式中：C_a 为吸收常数；C_d 为解吸常数；E_a 为吸氢活化能；E_d 为放氢活化能；R 为通用气体常数；p_g 为实时氢气压力；p_{eqa} 为吸氢平衡压力；p_{eqd} 为放氢平衡压力；ρ_s 为固态储氢材料的密度；ρ_{emp} 为全部氢气脱附后固态储氢材料的密度；ρ_{sat} 为氢气吸收饱和时固态储氢材料的密度。

平衡压力 p_{eq} 与固态储氢材料的温度相关[18]。

$$\ln p_{eq}=\frac{\Delta H}{RT}-\frac{\Delta S}{R} \tag{14}$$

式中：ΔH 为固态储氢材料的焓变；ΔS 为固态储氢材料的熵变。

在吸热反应中，固态储氢瓶放氢所需的热量 Q_{MH} 为

$$Q_{MH}=Q_{react}+Q_{H_2} \tag{15}$$

式中：Q_{react} 为化学气固反应所需的热量；Q_{H_2} 为随氢气从反应器中传递出去的热量。

$$Q_{H_2}=\dot{m}_d h_g \tag{16}$$

$$Q_{react}=\dot{m}_d\Delta h \tag{17}$$

式中：h_g 为释放单位质量氢气具有的热量。

固态储氢材料采用 $LaNi_5$，盘管材质为铝合金，固态储氢模型关键参数如表 2 所示。

螺旋盘管结构的固态储氢瓶是轴对称结构，其流动与传热传质模型由 COMSOL Multiphysics 6.2 的二维轴对称模型进行求解，燃料电池模型通过 Matlab 2023/Simulink 建立。PEM 燃料电池的电流密度决定了其耗氢率，固态储氢瓶的温度决定了氢气的释放速率，两者之间是相互匹配的。通过 Simulink 调用 COMSOL 的模型，实现整个系统的耦合，从而可以获得不同电流密度与温度下的输出功率与冷却水质量流量，进而探究采用不同换热盘

管对固态储氢瓶放氢时内部温度和氢气质量分数的影响机理，以及放氢速率和放氢深度随燃料电池工作温度的变化规律。

表 2 固态储氢模型参数

Tab. 2 Parameters for solid-state hydrogen storage model

参数	数值
吸收常数 C_a/s^{-1}	59.187
解吸常数 C_d/s^{-1}	9.57
吸氢活化能 $E_a/(kJ\cdot mol^{-1})$	21.170
放氢活化能 $E_d/(kJ\cdot mol^{-1})$	16.420
反应焓变 $\Delta H/(kJ\cdot mol^{-1})$	31.8
反应熵变 $\Delta S/(kJ\cdot mol^{-1}\cdot K^{-1})$	0.11
比定压热容 $c_{p,s}/(J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1})$	419
单螺旋盘管螺旋直径 D_t/mm	100
双螺旋盘管外螺旋直径 D_{t1}/mm	60
双螺旋盘管内螺旋直径 D_{t2}/mm	140
盘管直径 d/mm	20
储氢瓶高度 H/mm	240
储氢瓶直径 D/mm	200

2 结果分析

2.1 燃料电池输出功率与冷却水质量流量

图 2 为燃料电池在不同工作温度下的输出功率和冷却水质量流量随电流密度的变化规律。在低电流密度下，PEM 燃料电池的输出功率随着电流密度的增加而增大，而在高电流密度下，由于欧姆过电压的不断增大，导致输出功率反而减小。产生的余热随着电流密度的增大逐渐增加。在相同电流密度下，燃料电池输出功率随温度的增加而增大，产生的余热减少，同时由于冷却水换热温差增大，引起冷却水质量流量下降。

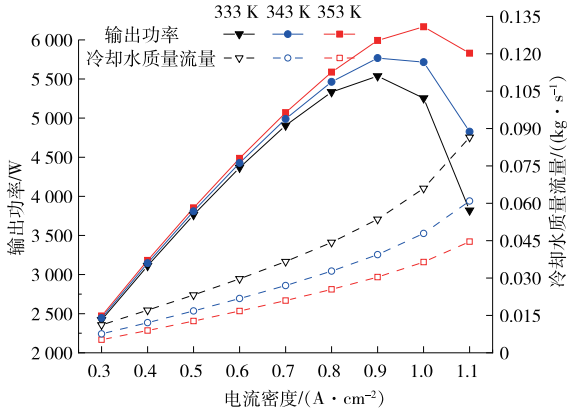


图 2 PEM 燃料电池输出功率和冷却水质量流量的变化

Fig. 2 Variations of output power and cooling water flowrate of PEM fuel cell

2.2 不同换热盘管结构性能的比较

固态储氢材料的导热系数较低，需要进行强化换热，保证热量能够有效地传递到固态储氢瓶的各个区域。直管换热结构简单，但是其传热效率较低，而螺旋管的表面积较大，流体在其内部流动时产生扰流，因此传热速率更高。随着氢气的释放，固态储氢瓶的温度会降低，进而导致其储氢压力降低。图3给出了氢气释放过程中固态储氢瓶压力降至 0.05 MPa 时，不同换热盘管条件下储氢材料内氢气质量分数的分布。直管结构的固态储氢瓶需 630 s 达到此压力，固态储氢瓶内部大部分区域的储氢材料并未脱氢，只有换热盘管周围小部分区域实现脱氢；单螺旋结构的固态储氢瓶需要 1 205 s 降至此压力，由于比直管结构有更大的接触面积，释放氢气的速率会提高，但是大部分的固态储氢材料没有及时吸收热量，释放氢气；双螺旋结构的固态储氢瓶需要 2 100 s 降至此压力，此时储氢瓶内部绝大部分区域的固态储氢材料释放出氢气，只有在远离换热盘管的上下两侧存在少部分未脱氢的储氢材料。

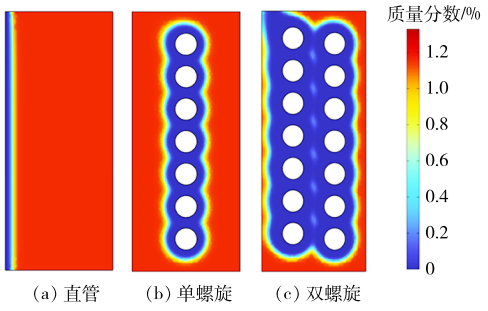


图 3 不同换热盘管结构固态储氢瓶内氢气质量分数分布

Fig. 3 Hydrogen mass fraction distributions in solid-state hydrogen storage cylinders with different coil configurations

图 4 为燃料电池在电流密度为 0.8 A/cm^2、工作温度为 353 K 条件下运行时，不同换热盘管的固态储氢瓶内的温度分布。固态储氢瓶通过左边轴侧的出气孔以一定的速率释放氢气，热量需要从循环盘管内获得，随着时间从 200 s 到 600 s，固态储氢瓶内的温度逐渐降低。由于双螺旋结构盘管的换热效果高于单螺旋盘管结构和直管结构，因此双螺旋盘管结构的储氢瓶内平均温度较高，可以更好地保证固态储氢瓶的换热。

固态储氢材料的低传热效率显著制约了脱氢反应的进行，换热盘管仅能与周围区域进行有效的换热。储氢瓶释放氢气可以分为 2 个阶段：第一阶段，换热盘管与周围区域进行高效换热，使氢气快速释放；第二阶段，随着脱氢反应的进行，换热盘管周围区域的氢气充分释放后，远离换热盘管的区域难以

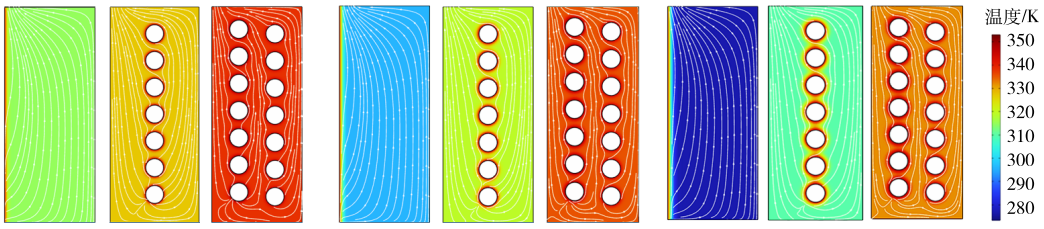


图 4　不同时刻下 3 种换热盘管结构的储氢瓶内的温度分布

Fig. 4　Temperature distributions inside the hydrogen storage cylinder with three types of heat exchange coil structures at different times

得到及时的热量补充，进而导致温度、氢气压力和放氢速率下降。

图 5 给出了不同换热盘管结构的固态储氢瓶内部平均温度、氢气压力、放氢速率和换热量的变化规律。由图 5(a)可以看出，在初始阶段，双螺旋盘管结构的固态储氢瓶内温度先升高，而后逐渐下降。由于初始阶段该结构储氢瓶的换热量大于脱附氢气所需的热量，固态储氢瓶的温度升高，随着释放氢气吸热过程的进行，温度又逐渐降低。由于直管结构和单螺旋结构的换热性能不及双螺旋结构，其压力和温度均单调下降。由图 5(b)可知，与其他 2 种换热盘管结构相比，双螺旋盘管结构的固态储氢瓶内压力最大，初始时刻其固态储氢瓶脱氢量大于 PEM 燃料电池耗氢量，并且储氢瓶内累积的氢气压力逐渐上升，由于氢气脱附吸热导致平均温度下降，瓶内的压力也随之下降。由图 5(c)可知，由于双螺旋盘管结构的换热性能好，在初始阶段双螺旋结构的储氢瓶放氢速率最高，而随着反应进行，放氢速率逐渐降低，在 690 和 1 010 s 时分别被直管和单螺旋结构超过。这是因为在初始阶段，双螺旋管储氢瓶的氢气释放较为充分，未完成脱氢的固态储氢材料较少，从而导致氢气的释放速率降低。由图 5(d)可以看出，双螺旋盘管结构的固态储氢瓶的换热量最大，因为双螺旋盘管结构的换热性能最好，初始阶段固态储氢瓶内脱附氢气吸收的热量最多，而直管的储氢瓶的换热量最小。

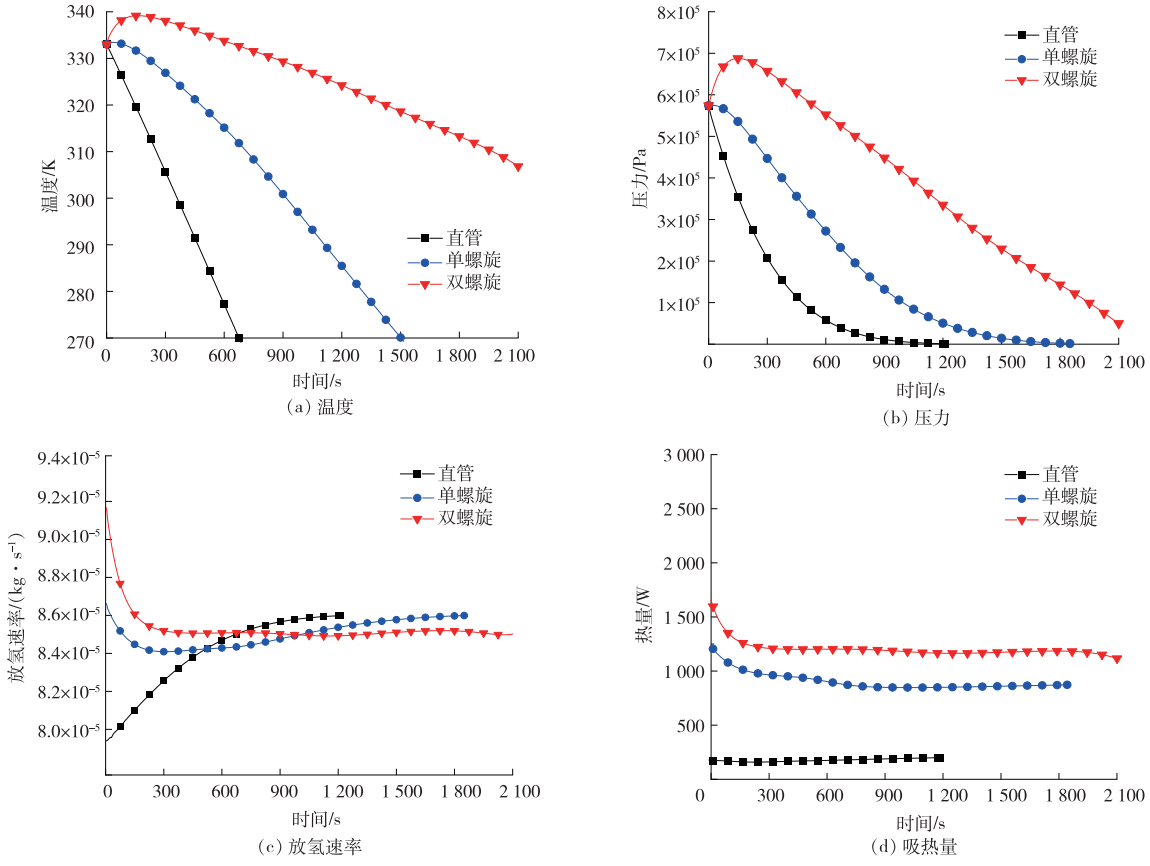


图 5　不同换热盘管结构对固态储氢瓶性能的影响

Fig. 5　Effect of different coil configurations on performance of solid-state hydrogen storage cylinders

2.3 燃料电池运行温度对耦合系统的影响

图 6 为 PEM 燃料电池运行温度在 333、343 和 353 K 时，双螺旋固态储氢瓶内压力降至 0.05 MPa 时氢气质量分数的分布，对应的时刻分别为 1 920、2 030 和 2 100 s。可以看出，最终时刻其氢气质量分数的分布基本相同。虽然燃料电池的运行温度较高时，其向固态储氢瓶的传热速率会增加，但是最后达到稳定运行时，PEM 燃料电池工作温度对最终的放氢深度影响有限。燃料电池运行温度上升 20 K，系统运行时间仅延长 180 s，固态储氢瓶放氢量只提升了 5.4%。提高燃料电池温度仅能提高初始阶段的放氢速率，满足燃料电池短时间内大功率运行，对放氢深度和放氢速率提高程度有限。

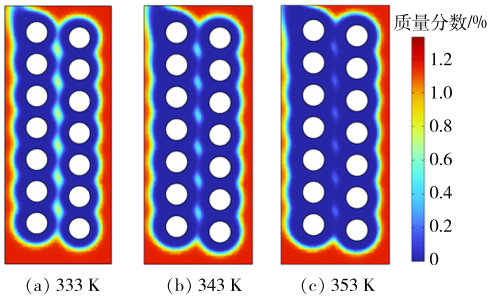


图 6 不同运行温度下储氢瓶内的氢气质量分数分布

Fig. 6 Hydrogen mass fraction distribution in hydrogen storage cylinders under different operating temperatures

PEM 燃料电池运行温度与冷却水出口温度相同，所以燃料电池工作温度的改变一方面会改变换热盘管内流体与固态储氢瓶内材料的温差，另一方面会改变燃料电池的效率，进而导致冷却水质量流量变化，换热速率也发生改变。图 7 是放氢时间为 600、1 200 和 1 800 s 时，燃料电池运行温度对于固态储氢瓶内温度分布的影响。在相同时刻，燃料电池运行温度越高，固态储氢瓶内的温度也越高。600 s 时固态储氢瓶内部温度梯度较小，这是因为换热盘管周围储氢材料放氢深度较低，氢气质量分数比较高，所以温度升高不明显；1 200 s 时换热盘管周围出现明显的温度分层，说明换热盘管周围储氢材料的氢气质量分数比较低，此时换热盘管的加热使储氢材料的温度升高。由于固态储氢瓶内部储氢材料的导热率低，所以换热盘管与其周围储氢材料的温差逐渐减小，换热速率降低，直至换热速率与固态储氢瓶材料的导热速率相等，而储氢瓶脱附氢气所需热量高于换热功率，所以整体温度随着放氢过程的进行不断降低。

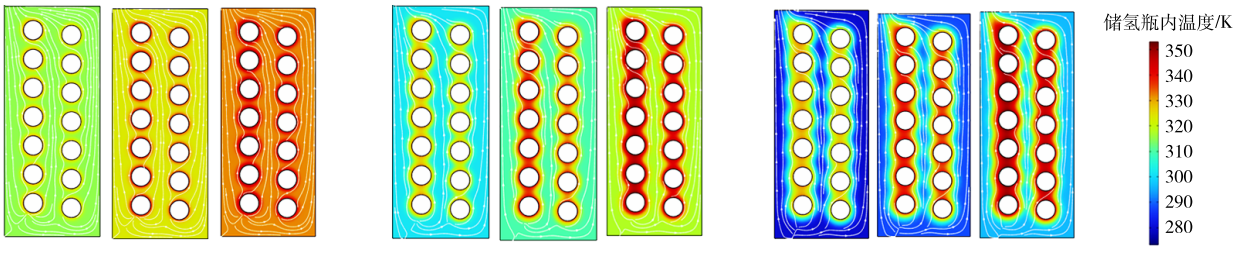


图 7 燃料电池运行温度对于固态储氢瓶内温度分布的影响

Fig. 7 Effect of operating temperature of PEM fuel cell on temperature distribution inside solid-state hydrogen storage cylinders

图 8 为不同 PEM 燃料电池运行温度下双螺旋盘管固态储氢瓶内温度、压力、放氢速率和换热速率的变化规律。由图 8(a)可知，运行温度为 353 K 时，初始换热温差较大，换热速率大于氢气脱附所需热量，导致瓶内温度逐渐上升，进而换热盘管与固态储氢瓶之间的换热温差降低，换热速率减小。运行温度为 333 K 时，储氢瓶的初始温度与燃料电池温度的差距较小，随着氢气的释放，固态储氢瓶的温度逐渐下降。由图 8(b)～图 8(d)可以看出，压力曲线与温度曲线变化一致，放氢速率与换热量变化趋势一致。在初始阶段，放氢速率高于氢气消耗量，氢气在固态储氢瓶内不断累积，引起压力升高。而在后期阶段，随着脱氢反应的进行，高温区域逐渐完成脱氢，而氢气质量分数较高的区域温度较低，导致放氢速率低于氢气消耗量，储氢瓶内氢气质量下降，压力降低。

由于运行温度不同导致换热速率不同，燃料电池工作温度对于系统性能的影响在初始和后期阶段也不同。在初始阶段，换热及氢气的脱附主要发生在换热盘管附近，因此运行温度对换热速率和释放氢气速率的影响很大；而在后期阶段，换热盘管附近区域氢气充分释放，换热主要发生在远离盘管的区域，燃料电池运行温度较高时，虽然冷却水温度较高，但相应的质量流量有所降低，进而导致换热速率下降，与其他工作温度下的换热速率接近，最终导致燃料电池工作温度对放氢速率和总的放氢量影响不大。

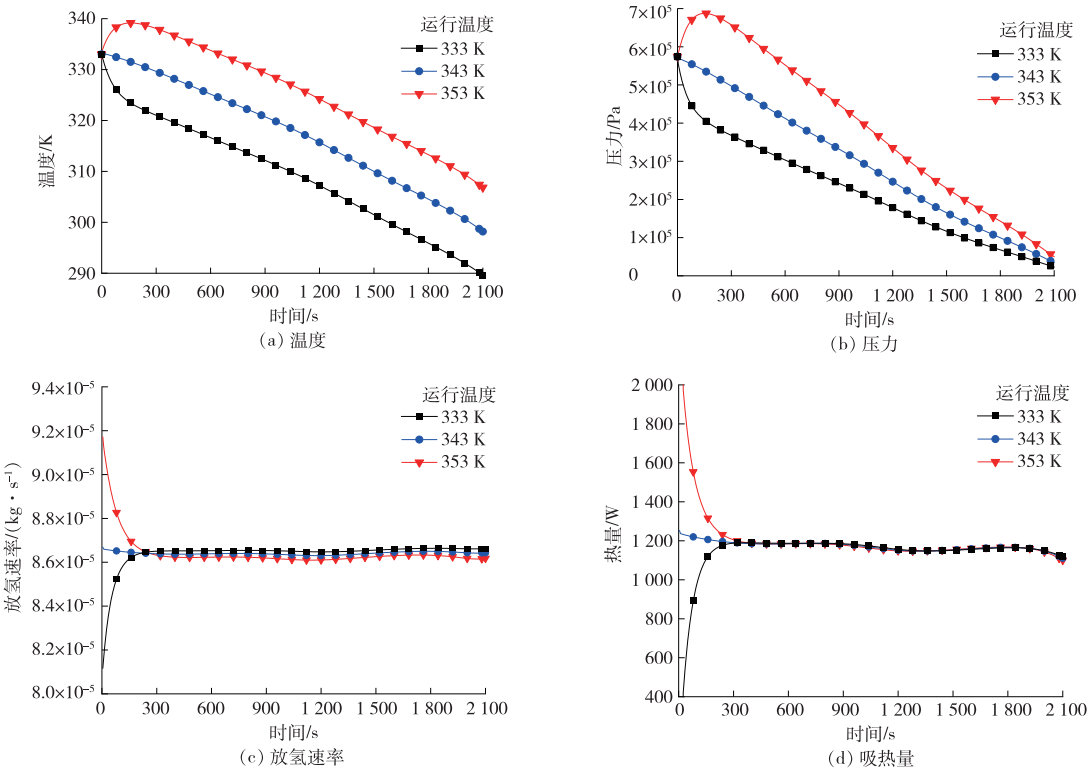


图 8　不同燃料电池运行温度对储氢瓶性能的影响

Fig. 8　Effect of different operating temperatures of PEM fuel cell on the performance of hydrogen storage cylinders

3　结论

（1）随着电流密度的增加，PEM 燃料电池的功率先增加，后逐渐减小，而冷却水质量流量逐渐增加。

（2）双螺旋盘管结构具有较高的传热系数和较大的换热面积，可以有效提升固态储氢材料的放氢速率，提高燃料电池余热利用比例。

（3）提高 PEM 燃料电池工作温度能够显著提高固态储氢瓶释放氢气时初始阶段的温度、压力和放氢速率，但对总的放氢量影响不大。

对于燃料电池和固态储氢的耦合系统，应该重点提高固态储氢瓶内的换热效率，改善换热结构，使固态储氢瓶内的更多区域同时脱氢，而非强化局部的脱氢过程。

参考文献：

[1] 谢昂均，杨正军，徐钢，等. 我国能源行业实现碳中和的产业链情景分析[J]. 动力工程学报，2024，44(11)：1733-1740，1749.
XIE Angjun，YANG Zhengjun，XU Gang，et al. Scenario analysis of the industrial chain for achieving carbon neutrality in China's energy industry[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2024，44(11)：1733-1740，1749.

[2] 刘传亮，郭万贵，孔心璇，等. 西北地区宽功率光伏离网制氢技术进展与发展前景[J]. 动力工程学报，2022，42(8)：762-768.
LIU Chuanliang，GUO Wangui，KONG Xinxuan，et al. Progress and development prospects of wide-power photovoltaic off-grid hydrogen production technology in northwest China[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2022，42(8)：762-768.

[3] 李成杰，王紫璇，李博，等. 基于替代燃料的燃料电池内燃机混合动力系统方案探讨与性能浅析[J]. 动力工程学报，2022，42(11)：1146-1153.
LI Chengjie，WANG Zixuan，LI Bo，et al. Discussion and performance analysis of fuel cell internal combustion engine hybrid power system with alternative fuel[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2022，42(11)：1146-1153.

[4] 徐静，潘权稳，张威，等. 燃料电池余热驱动吸附制冷复合系统仿真研究[J]. 工程热物理学报，2022，43(11)：2874-2879.
XU Jing，PAN Quanwen，ZHANG Wei，et al. Simulation study on a hybrid adsorption refrigeration system driven by low-grade heat sources from fuel cells[J]. Journal of Engineering Thermophysics，2022，43(11)：2874-2879.

[5] ISLAM M R，SHABANI B，ROSENGARTEN G，et al. The potential of using nanofluids in PEM fuel cell cooling systems：a review[J]. Renewable and

Sustainable Energy Reviews, 2015, 48:523-539.

[6] MAHMOODI F, RAHIMI R. Experimental and numerical investigating a new configured thermal coupling between metal hydride tank and PEM fuel cell using heat pipes[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 178:115490.

[7] KHAITAN S K, RAJU M. Discharge dynamics of coupled fuel cell and metal hydride hydrogen storage bed for small wind hybrid systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(3): 2344-2352.

[8] WEISS-UNGETHÜM J, BÜRGER I, SCHMIDT N, et al. Experimental investigation of a liquid cooled high temperature proton exchange membrane (HT-PEM) fuel cell coupled to a sodium alanate tank[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(11):5931-5941.

[9] RIZZI P, PINATEL E, LUETTO C, et al. Integration of a PEM fuel cell with a metal hydride tank for stationary applications[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 645:S338-S342.

[10] TETUKO A P, SHABANI B, OMRANI R, et al. Study of a thermal bridging approach using heat pipes for simultaneous fuel cell cooling and metal hydride hydrogen discharge rate enhancement[J]. Journal of Power Sources, 2018, 397:177-188.

[11] OMRANI R, NGUYEN H Q, SHABANI B. Thermal coupling of an open-cathode proton exchange membrane fuel cell with metal hydride canisters: an experimental study[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(53):28940-28950.

[12] YAO Jing, ZHU Pengfei, QIAN Chenhui, et al. Study of an autothermal-equilibrium metal hydride reactor by reaction heat recovery as hydrogen source for the application of fuel cell power system[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 213:112864.

[13] PUKRUSHPAN J T, PENG H, STEFANOPOULOU A G. Simulation and analysis of transient fuel cell system performance based on a dynamic reactant flow model[C]//ASME 2002 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, New Orleans, USA: ASME, 2002.

[14] LARMINIE J, DICKS A. Fuel cell systems explained[M]. Chichester: Wiley, 2000.

[15] MANN R F, AMPHLETT J C, HOOPER M A I, et al. Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell[J]. Journal of Power Sources, 2000, 86(1/2):173-180.

[16] KHAN M J, IQBAL M T. Modelling and analysis of electro-chemical, thermal, and reactant flow dynamics for a PEM fuel cell system[J]. Fuel Cells, 2005, 5(4):463-475.

[17] XING Lu, CHANG Huawei, ZHU Runqi, et al. Thermal analysis and management of proton exchange membrane fuel cell stacks for automotive vehicle[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(64):32665-32675.

[18] BAI Xiaoshuai, YANG Weiwei, TANG Xinyuan, et al. Hydrogen absorption performance investigation of a cylindrical MH reactor with rectangle heat exchange channels[J]. Energy, 2021, 232:121101.