

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-09

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20260806001

基于均温板的车用燃料电池堆被动式热管理实验研究

柏兴应^{1,2} 蔡军^{1,2} 杨贤飞^{1,2} 陈赵斌^{1,2}

(1 中国电器科学研究院股份有限公司 广州 510220; 2 威凯检测技术有限公司 广州 510700)

摘要 随着车用燃料电池堆的功率逐渐增大,良好的热管理对电池堆输出性能和耐久性至关重要。为避免常规冷却方式引起的寄生功耗,减少系统应用成本,本文提出了一种基于均温板的被动式热管理方案,设计开发了厚度为1.32 mm的均温板,理论分析和测试其热特性,并将其集成至一个燃料电池堆中开展实验研究。结果表明:均温板能够快速响应负载变化引起的温度变化,热流密度为22.7 W/cm²时板内最大温差仅为2.6 °C,避免了电池堆运行温度过高引起的性能衰减,电压比普通电池堆提升了21.7%且具有更好的单电池性能一致性,可为车用燃料电池热管理系统的设计优化提供新的参考和思路。

关键词 车用燃料电池堆;热管理;均温板;性能一致性

中图分类号: TM911.42; TM911.46

文献标识码: A

Experimental Study on Passive Thermal Management of Automotive Fuel Cell Stacks based on Vapor Chamber

Bai Xingying^{1,2} Cai Jun^{1,2} Yang Xianfei^{1,2} Chen Zhaobin^{1,2}

(1. China National Electric Apparatus Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510220, China; 2. CVC Testing Technology Co., Ltd., Guangzhou 510700, China)

Abstract

Objective Thermal management is crucial for ensuring the performance, safety, and longevity of proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs). While excessively high temperatures can degrade the membrane electrode assembly and cause irreversible damage, excessively low temperatures impede reaction kinetics and may even lead to flooding. Consequently, it is essential to implement appropriate thermal management strategies to maintain the operating temperature of PEMFCs within an optimal range and ensure a uniform temperature distribution inside the stack. However, air cooling tends to produce uneven temperature distributions along the flow path due to the low specific heat capacity of air. Liquid cooling requires pumps to drive the coolant through the cooling channels, which incurs additional parasitic power losses and thereby reduces overall system efficiency. To mitigate the parasitic power consumption associated with conventional air and liquid cooling, this study proposes a novel passive cooling scheme that integrates vapor chambers (VCs) into a PEMFC stack for thermal management.

Methods Both theoretical analysis and experimental approaches were employed to evaluate the heat transfer performance of a standalone VC and a fuel cell stack integrated with VCs. First, the heat generation and transfer mechanisms within the fuel cell and heat transfer characteristics of the VC were analyzed. Based on the capillary force limit, the relationship between the structural dimensions of the VC and its maximum heat transfer capacity was determined. Subsequently, an ultra-thin VC with a heat transfer capacity exceeding 40 W and thickness of only 1.32 mm was designed and manufactured according to the heat dissipation requirements of a 200 W open-cathode PEMFC stack. In the thermal performance test of the single VC, a silicone heating pad was bonded to the VC's evaporator side using thermal grease. The heating power was varied from 0 to 48 W using a resistive load to simulate PEMFC heat generation. Additionally, a custom-made aluminum alloy cold plate was attached to the VC's condenser side to dissipate heat, with the cooling water flow rate maintained at 0.1 L/min. Twenty-four thermocouples were evenly spaced at 20-mm intervals on the opposite face of the VC. Temperatures were recorded via a data logger and subsequently transmitted to a computer for storage and analysis. After verifying the heat dissipation capability, five VCs were integrated into a 200 W PEMFC stack to conduct a rapid start-up load test, where the current was ramped from 0 to 40 A within 45 s. A thermocouple was installed in the cathodic central flow channel of the cathode of each cell to monitor temperature variations. The hydrogen supply pressure at the anode was 0.05 MPa, and the oxygen flow rate at the cathode was 0.03 m³/s. The ambient temperature and relative humidity were 26.3 °C and 63%, respectively.

收稿日期:2026-08-06;修回日期:2026-08-19;录用日期:2026-08-19

Results and Discussions In the single VC test, when the heating power was varied, the VC rapidly reached a new equilibrium state within each 6-min test cycle, demonstrating excellent thermal response. From 0 to 48 W, the maximum temperature difference across the VC consistently remained below 3 °C. At 48 W (a heat flux of 22.7 W/cm² across the VC cross-section), the maximum temperature difference was only 2.6 °C, and the thermal resistance was 0.054 °C/W, exhibiting a downward trend with increasing heat load. These results indicate that the manufactured VC possesses excellent temperature-equalizing capability. Following the start-up test, the average output voltage of the VC stack was 5.27 V, compared with 4.33 V for the conventional stack, representing a 21.7% improvement. The temperatures of 10 cells in the VC stack ranged from 47.0 to 52.5 °C, yielding a maximum inter-cell temperature difference of 5.5 °C. In contrast, the cells in the conventional stack exhibited a range of 53.2 to 63.3 °C, with a maximum inter-cell temperature difference of 10.1 °C. The integrated VC effectively prevented performance degradation arising from non-uniform stack operating temperatures.

Conclusions To improve the thermal management of PEMFC stacks, this study integrates a passive heat transfer unit, namely, a VC, into an open-cathode fuel cell stack. The fabricated VC operates at a heat flux of only 0.052 W/cm² on the evaporator side and exhibits a thermal resistance of only 0.054 °C/W under a heat load of 48 W, demonstrating excellent thermal response and heat transfer performance. The integration of the VC into the stack enables rapid dissipation of heat generated by electrochemical reactions while maintaining a uniform temperature distribution throughout the stack. This approach effectively mitigates performance degradation arising from inadequate thermal management, thereby providing a valuable reference for optimizing the thermal management design of automotive fuel cell stacks.

Keywords automotive fuel cell stack; thermal management; vapor chamber; performance consistency

随着全球能源结构转型和“双碳”目标的推进,质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)因能量转换效率高、零排放、工作温度低等优势,被认为是车用动力系统的理想替代方案之一^[1]。随着锂离子电池在乘用车领域的成熟应用,车用燃料电池应用重心逐渐向商用车转移,功率需求逐渐增大。但PEMFC在运行过程中,电化学反应释放废热与电功率处于同一量级,而电池最佳工作温度区间为60~80 °C^[2],热管理问题已成为制约其性能与寿命的关键技术难题。

温度过低时催化剂活性不足,甚至会导致电极“水淹”,阻碍反应气体扩散;温度过高则会引致质子交换膜脱水、催化剂降解,甚至引发热失控^[3]。此外,受反应气体传输分布和催化剂分布的影响,电池堆内部存在显著的温度不均匀性,不同单体电池间最大表面温差可高达20 K^[4],这种非均匀温度分布显著加剧了电池堆性能的衰减与劣化。目前,车用PEMFC的热管理方案主要包括空气冷却、液体冷却和相变冷却等^[5]。空气冷却系统结构简单,但散热能力有限,仅适用于100 W以下的低功率场景。液体冷却散热效率高,但需配备水泵、散热器和复杂管路,增加系统寄生功耗的同时还会使系统成本增加。近年来,基于热管技术的被动式热管理因无需额外功耗、结构简单、响应迅速等优势得到了广泛关注。A. Faghri等^[6]设计了2种热管与燃料电池耦合的方案:一种是将微热管插入双极板中用于燃料电池堆的热控制,另一种是将平板热管与石墨双极板集成,改善了电池堆内的温度均匀性。Sun Shimei等^[7]基于燃料

电池传热问题,建立了耦合有热管冷却系统的燃料电池数学模型,结果发现热管冷却工质温度、冷凝端和蒸发端长度比对电池温度分布有显著影响。然而,传统圆柱形热管难以与扁平化的燃料电池堆结构集成,且多根热管布置会显著增加系统体积和重量,不利于车用场景的紧凑性要求。

均温板(vapor chamber, VC)作为一种二维平板式相变传热器件,兼具热管的高导热特性和几何延展性,且均温板具有更大的换热平面能更好地贴合并满足不同反应活性面积的质子交换膜燃料电池在二维平面内散热均温的需求。并且均温板整体厚度可控制在2 mm以内形成超薄均温板^[8],实现更紧凑的燃料电池结构。本文设计制造了厚度为1.32 mm的均温板,理论分析和测试了该均温板的散热特性,并将其集成至质子交换膜燃料电池堆中。实验研究了该电池堆在动态启动和稳态运行过程中的输出特性,与普通燃料电池堆对比,验证了均温板在燃料电池冷却系统中的有效性,研究成果可为大功率车用燃料电池堆热管理系统的设计优化提供理论及数据支撑。

1 均温板与燃料电池堆传热分析

1.1 燃料电池传热特性

分别向阳极和阴极供应燃料及氧化剂后,质子交换膜燃料电池堆的整体能量平衡可表示为^[2]:

$$\sum(m_i h_i)_{in} = W_{el} + \sum(m_i h_i)_{out} + Q_{gen} \quad (1)$$

式中: m_i 和 h_i 分别为物质 i 的质量流量(kg/s)和焓值(kJ/kg); W_{el} 为输出的电能,W; Q_{gen} 为电池堆内部产生

的热量, W ; 下标 i 代表燃料、氧化剂及反应产物; in 和 out 分别表示进入和离开电池堆。 Q 主要包括阴极催化层的电化学反应热、不同组件内部及界面间的欧姆热、水蒸气冷凝放热以及其他不可逆热。假设电池堆内所有单电池的反应气体分布均匀, 反应速率相同, 燃料的化学能只转化为输出电能和热量^[2]。 PEMFC 电池堆的总能量平衡可近似计算为:

$$\frac{jA_{act}}{2F} H_{fuel} N_{cell} = Q_{gen} + jA_{act} U_{cell} N_{cell} \quad (2)$$

式中: j 为电流密度, A/cm^2 ; U_{cell} 为电池电压, V ; A_{act} 为反应活性面积, cm^2 ; F 为法拉第常数; H_{fuel} 为燃料热值, kJ/mol ; N_{cell} 为电池堆中的单电池数量。式(2)中电池堆产热可计算为^[9]:

$$Q_{gen} = jA_{act} (E_t - U_{cell}) N_{cell} \quad (3)$$

式中: E_t 为理论可逆电压, V 。

电池堆内部热量主要通过4种路径传递^[10], 如图1(a)所示: 1) 约11.1%的电池内部产热 Q_1 会在不同固体部件之间传导, 引起电池堆整体温度升高; 2) 一部分热量 Q_2 通过在阴阳极流道中与未反应的气体和反应产物发生热对流排出电池堆, 约占4.4%; 3) 约占80%的热量 Q_3 则通过冷却系统向外释放; 4) 由于 PEMFC 的运行温度较低, 约4.4%的热量 Q_4 通过热辐射或自然对流的方式向环境散失。电池堆内的热平衡可表示为:

$$Q_{gen} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (4)$$

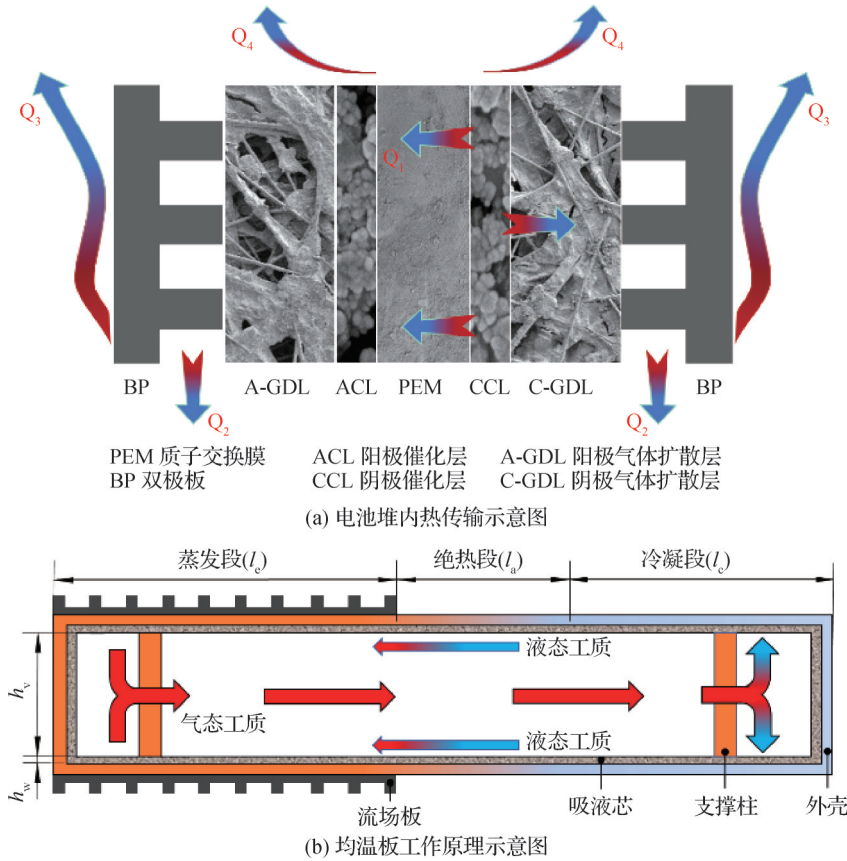


图1 电池堆内热传输及均温板工作原理

Fig.1 Heat transfer within the stack and the operating principle of vapor chamber

1.2 均温板传热特性

均温板的工作原理如图1(b)所示, 液态工质在蒸发段吸收热量相变为气态, 气态工质在蒸汽腔内压力的推动下向另一端运动, 在冷凝段凝结为液态工质并释放汽化潜热, 液态工质在吸液芯毛细力作用下流回蒸发段, 再次受热蒸发。为了保证不同状态的工质能在均温板内循环流动, 吸液芯毛细力的作用必须大于工质循环过程中的流动阻力。因此,

常规状态的均温板中存在以下压力平衡^[11]:

$$\Delta p_{cap} \geq \Delta p_v + \Delta p_l + \Delta p_g \quad (5)$$

式中: Δp_{cap} 为均温板吸液芯的最大毛细压力, Pa ; Δp_v 和 Δp_l 分别为蒸发段和冷凝段之间气态和液态工质的流动压降, Pa ; Δp_g 为重力压降, Pa , 与蒸发段和冷凝段的相对位置有关。分别计算如下^[12-14]:

$$\Delta p_{cap} = \frac{2\sigma \cos\theta}{r_w} \quad (6)$$

$$\Delta p_v = \frac{\mu_v l_{eff} P_o Q}{2 \rho_v h_{fg} A_v d_h^2} \quad (7)$$

$$\Delta p_l = \frac{\mu_l l_{eff} Q}{\rho_l h_{fg} A_w K} \quad (8)$$

$$\Delta p_g = -\rho_l g l_{eff} \cos \beta \quad (9)$$

式中: σ 为液态工质的表面张力, N/m; r_w 为吸液芯颗粒的有效半径, m; θ 为均温板吸液芯的接触角, ($^\circ$); μ_v 为气态工质的黏度, Pa·s; P_o 为泊肃叶数^[15]; ρ_v 、 ρ_l 分别为气态工质、液态工质的密度, kg/m³; h_{fg} 为工质相变潜热, kJ/kg; Q 为均温板的传热功率, W; A_v 为气态工质流动腔的横截面积, m²; l_{eff} 和 d_h 分别为均温板的有效长度和水力直径, m; μ_l 为液态工质的黏度, N·s/m²; A_w 和 K 分别为均温板吸液芯的横截面积(m²)和渗透率; g 为重力加速度, m/s²; β 为液态工质流动方向与重力方向的夹角, ($^\circ$)。

均温板的传热能力主要取决于吸液芯毛细力, 当内部各种压力损失之和与吸液芯的最大毛细压力相等时, 均温板达到换热极限。此时式(5)中两侧的压降完全相等, 代入式(6)~式(9)化简整理后可得均温板的最大换热量:

$$Q_{max} = \frac{2\sigma \cos \theta + \rho_l g l_{eff} r_w \cos \beta}{\left[\frac{\mu_l}{\rho_l h_{fg} K} + \frac{\mu_v P_o (w + h_v)^2}{4 \rho_v w^2 h_v^3} \right]} \frac{2wh_{fg}}{r_w l_{eff}} \quad (10)$$

2 均温板及电池堆集成设计制造

为了满足 PEMFC 电池堆的散热需求, 均温板的最大换热量至少要大于电池堆通过冷却系统释放的热量 Q_3 。本文设计的均温板质子交换膜燃料电池堆(vapor chamber pemfc, VC-PEMFC)是基于一个包含 10 个单电池, 活性面积为 62 cm² 的普通阴极开放式 PEMFC 电池堆的结构集成耦合均温板后改进得到, 考虑装配结构的稳定性, 将在 10 个单电池中间隔安装 5 块均温板。已开展的测试表明, 在平均单电池电压为 0.6 V 的额定工况下, 包含 10 个单电池的普通阴极开放式电池堆产热量约为 200 W。假设极端情况下, 电池堆所有产热均由 5 块均温板散出, 则每块均温板的传热功率至少应为 40 W。综合考虑制造成本和不同均温板结构参数对传热性能的影响, 采用具有良好导电性和导热性的铜板作为均温板基底外壳, 厚度为 0.2 mm。在铜板上采用毛细力较大的烧结铜粉吸液芯结构, 厚度为 0.3 mm, 颗粒直径为 120~200 目。同时为了防止压缩变形和热膨胀, 在铜板上均匀刻蚀直径为 2 mm 的支撑柱, 如图 2(a)所示。将 2 块附着有烧结铜粉吸液芯的铜板对称焊接组成均温板, 2 块壳板之间的蒸气腔间隙为 0.32 mm。

均温板整体的厚度仅为 1.32 mm, 属于厚度小于 2 mm 的超薄均温板^[16], 集成至质子交换膜燃料电池堆中可使整体结构更紧凑。最后对均温板蒸汽腔抽真空并充入去离子水作为工作介质, 该均温板的相关尺寸参数如表 1 所示。

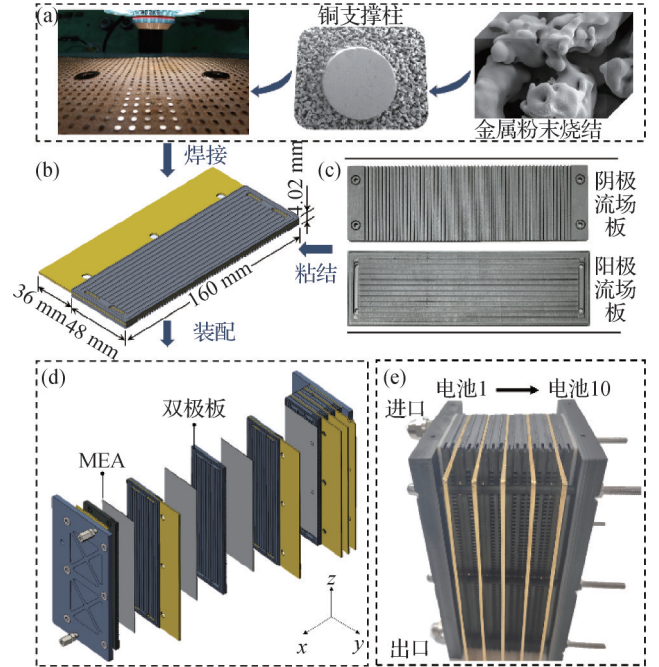


图 2 均温板集成至质子交换膜燃料电池堆流程

Fig.2 Process for integrating vapor chambers into the PEMFC stack

表 1 均温板及电池堆结构参数

参数	值	参数	值
均温板数量	5	单电池数量	10
VC 整体尺寸/mm	160×80×1.32	阳极流道尺/mm	145×1.2×0.4
冷凝段长度/mm	32	阴极流道尺/mm	50×1.3×1.8
蒸发段长度/mm	48	阳极板厚度/mm	1.4
吸液芯接触角/($^\circ$)	113 $^\circ$	阴极板厚度/mm	2.3
吸液芯厚度/mm	0.3	双极板厚度/mm	3.7

为满足电池堆热管理中散热均温的要求, 完成均温板制造后, 将石墨制成的阳极流场板和阴极流场板分别黏结至均温板蒸发端的两侧, 以完全覆盖电池的电化学反应产热区域。如图 2(c)所示, 本文所用阳极流场板和阴极流场板一侧加工为平行直流场, 另一侧保持平整使其与均温板蒸发端紧密贴合, 具体尺寸参数详见表 1。为保证均温板与流场板间良好的导热性和导电性, 在两者间采用导电的热黏合剂并热压。由均温板与阴阳极流场板组成的散热

流场板单元如图2(b)所示,两端的4个空槽为阳极氢气通道,中部的3个圆孔则是为组装电池堆预留的螺杆安装位置。

在组装过程的最后阶段,将5个散热流场板单元与10个膜电组件以及6个双极板交替堆叠,形成一个集成有均温板的质子交换膜燃料电池堆,如图2(d)和图2(e)所示。与常规阴极开放式PEMFC电池堆相比,除均温板外,无须任何特殊结构设计,极大地减小了系统复杂性。同时均温板冷凝端在同侧伸出电池堆的结构布置,可通过自然对流或强制对流的方式带走热量,增强系统冷却能力。如图2(e)所示,为方便分析说明,将单电池按其进口距离的远近依次记为电池1~10。

3 实验设置

为验证均温板应用于电池堆热管理的可行性,首先利用加热片黏结在均温板蒸发端模拟燃料电池产热,测试均温板在不同功率下的散热性能。随后,考虑到车用燃料电池在实际应用中面临着快速启动加载时的快速升温问题,开展快速启动加载实验。

在单个均温板的散热性能测试中,利用导热硅胶将硅胶加热片(140 mm×35 mm×2 mm)和1个自制的铝合金水冷模块(160 mm×35 mm×12 mm)分别贴附在均温板的蒸发端和冷凝端,如图3(a)所示。通过一个直流负载调节蒸发端加热片的加热功率,热量传递至均温板冷凝端后,与水冷模块内部由水泵驱动循环的去离子水进行换热。高温冷却水与一个翅片换热器换热后流回水箱中再次循环,通过安装在水冷模块进口处的流量器调节整个系统的冷却水流量,本研究中恒定为0.1 L/min。为监测均温板传热特性,在均温板的另一侧以20 mm的间隔均匀布置了24个热电偶,并通过数据采集仪记录数据传输至电脑中存储分析。为减少环境热损失的影响,将黏附冷却模块、硅胶加热片及热电偶的均温板包裹在厚度为10 mm的保温棉中。实验过程中,环境相对湿度为60%,温度为22.5℃。蒸发端加热功率从0 W开始以4 W的步长递增至48 W,每个功率持续加载6 min使每个热电偶测点温度稳定后再进行下一功率测试。

将均温板集成至电池堆中,实验系统如图3(b)所示。纯度为99.999%的干燥氢气不预热或加湿,经调压阀后以0.05 MPa的压力供入电池堆阳极。阳极出口安装有1个由单片机控制的电磁阀使电池堆以阳极闭端模式运行,吹扫周期为每隔30 s吹扫0.5 s。以环境空气作阴极氧化剂,通过2个轴流风扇

以0.03 m³/s的流量供入阴极,温度和相对湿度分别为26.3℃和63%。为了提高均温板的散热效果和温度均匀性,同时避免阴极供气过多造成质子交换膜脱水的风险,还设置了一个轴流风扇以0.017 m³/s的流量与均温板冷凝端对流传热。根据文献[17]提出的速率递减优化启动加载策略,通过电子负载控制电池堆在45 s内从0 A快速启动加载至40 A,并在每个单电池阴极中部流道中各安装1个热电偶,研究集成有均温板的电池堆的动态响应特性。最后,通过数据采集仪记录电池堆的温度、电流、电压等数据并传入电脑。

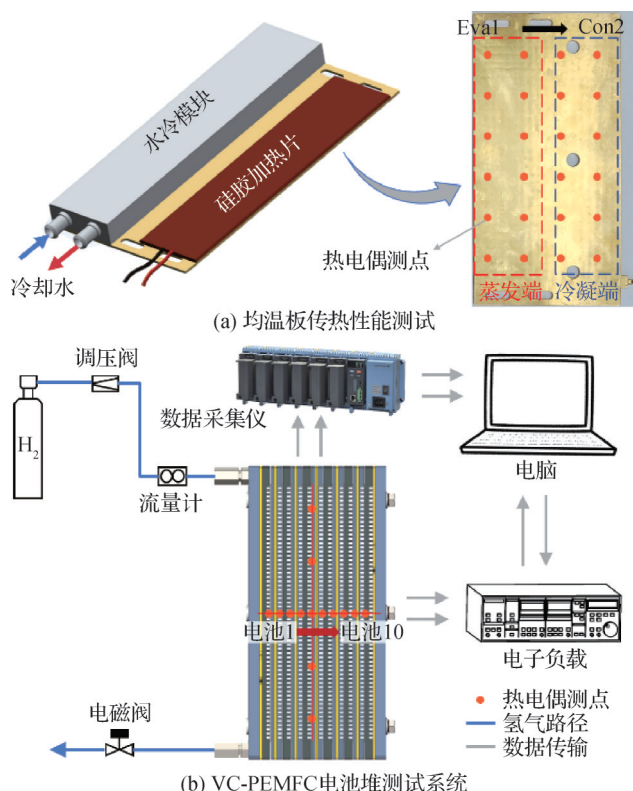


图3 均温板传热性能及 VC-PEMFC 电池堆测试系统
Fig.3 Heating transfer performance of the vapor chamber and VC-PEMFC stack testing system

4 结果分析讨论

4.1 均温板传热性能分析

在均温板的传热性能实验中,不同位置温度随加热功率的变化如图4(a)所示。Eva 1、Eva 2 和 Con 1、Con 2 分别代表图3(a)中从均温板左侧起蒸发端和冷凝端每一列温度测点的平均温度。均温板整体温度随加热功率的增加而升高,并呈现出阶梯状的变化规律,说明当加热功率变化后均温板在每个功率6 min的测试周期内很快就能达到新的平衡状态,其热响应时间明显小于文献[18]报道的500~900 s,

说明制造的均温板具有良好的热响应能力。

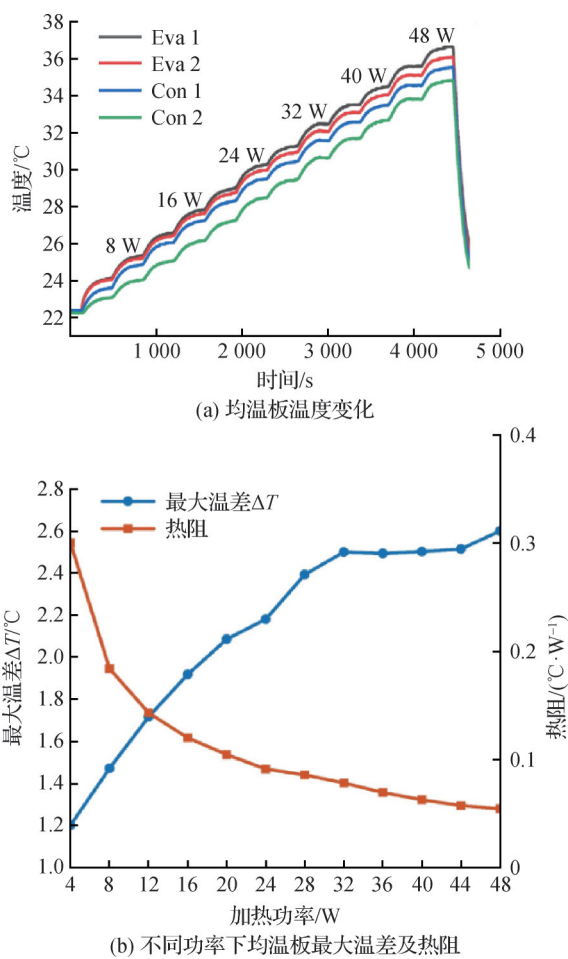


图4 均温板传热性能

Fig.4 Heat transfer performance of vapor chamber

图4(b)所示为不同加热功率下均温板内的最大温差和热阻。由图4(b)可知,32 W前最大温差 ΔT 几乎呈线性增加,而32 W后逐渐趋于稳定。这归因于测试中冷却水流量和进口温度保持不变,加热功率小于32 W时,随着功率增大蒸发端温度不断升高,与冷凝端的温差逐渐增大。在32 W之后加热功率接近这一冷却水流量的换热极限,均温板温差 ΔT 趋于稳定。但即使在48 W,即均温板横截面热流密度为 22.7 W/cm^2 时,均温板的最大温差也仅为 2.6°C 。这证明了制造的均温板具有良好的均温能力。不同于最大温差 ΔT ,均温板的热阻随加热功率的增加而减小。加热功率从4 W增至12 W时,热阻从 0.30°C/W 急剧下降至 0.14°C/W 。热阻近半的降低是由于4 W时均温板尚未完全激活,蒸发端积聚的液膜热阻较大,随着加热功率增大,均温板内部工质被驱动循环,热阻迅速减小。此外,48 W时均温板热阻为 0.054°C/W ,仍具有下降的趋势,尚未达到蒸发端液态工质无法及时回流补充引起的传热极限。结合第2节可知该

均温板能满足质子交换膜燃料电池的散热需求。

根据不同加热功率下均温板24个热电偶测点(图3(a))的温度数据绘制的整体温度分布图如图5所示。由图5可知,可以观察到整个均温板在宽度方向上温度分布相对均匀,而在长度方向上沿蒸发端至冷凝端存在明显的温度变化。其中,蒸发端左侧温度最高,最低温度则出现在与水冷模块冷却水进口区域贴合的冷凝端右上侧区域。从0 W至48 W的加热过程中,均温板的最大温差仍始终保持在 3°C 以内。

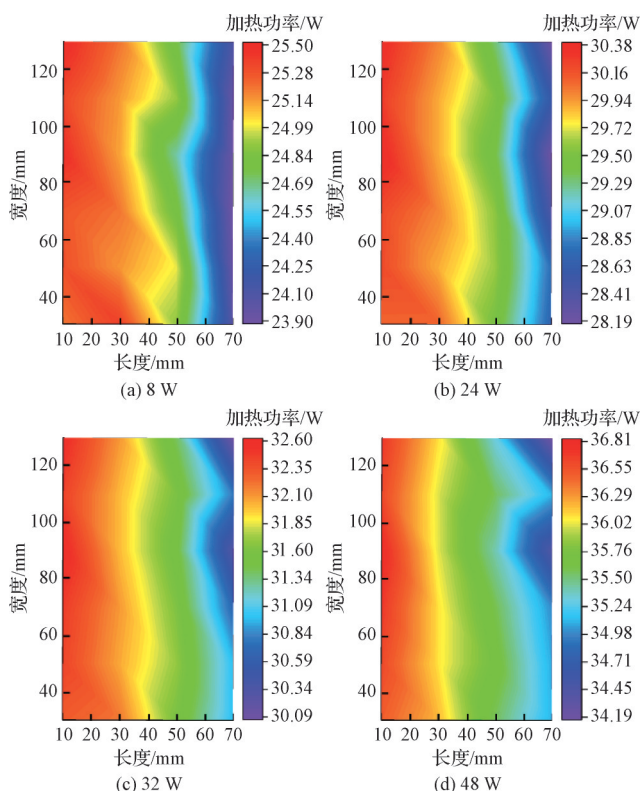


图5 不同加热功率下均温板温度分布云图

Fig.5 Contour of temperature distribution on the vapor chamber at different heating powers

4.2 电池堆动态启动加载特性分析

为进一步验证均温板在电池堆热管理的有效性,将集成有均温板的阴极开放式电池堆(简称:均温板电池堆)与一个结构相同且同样包含10个单电池,活性面积为 62 cm^2 但无均温板的普通阴极开放式电池堆(简称为普通电池堆)进行对比。实施相同的启动加载策略,启动过程中的电池堆电压和电压波动率变化如图6所示。在图6(a)中,加载电流变化初期,均温板电池堆与普通电池堆的电压基本相同。但在接近加载末期时,出现了明显的性能差异。均温板电池堆电压缓慢下降并逐渐稳定在5 V以上,而普通电池堆电压近乎线性下降至约4 V。启动加载

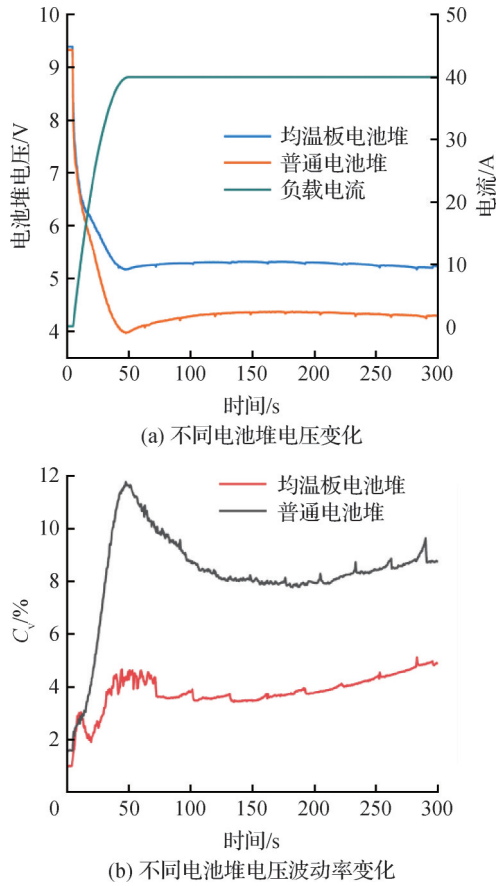


图6 不同电池堆电压及电压波动率对比

Fig.6 Comparison of stack voltages and voltage fluctuation rates

结束后,负载电流稳定不变时,均温板电池堆平均电压为5.27 V,普通电池堆平均电压为4.33 V,前者比后者提高了21.7%。2个电池堆的测试条件基本一致,均温板电池堆中流场板与均温板间的热黏合剂导电性优于石墨,而石墨导热性能远超热黏合剂,两者性能平衡,可近似认为2个电池堆的区别仅在于有无集成均温板。因此,可初步推测普通电池堆的性能下降是未集成均温板导致运行温度不适宜造成的。此外,由图6(b)可知,2个电池堆的电压波动率均随负载电流的加载急剧上升,在50 s启动加载结束后逐渐下降并趋于稳定。启动加载过程中均温板电池堆的电压波动率 C_v 明显小于普通电池堆,说明均温板电池堆内的10个单电池具有更好的电压均匀性。这也在一定程度上反映了均温板电池堆内部的温度分布更加均匀,因为电池产热与电化学反应直接相关。负载电流为40 A时,电流密度为0.65 A/cm²,高电流密度下电池堆内部产水产热增加,单电池电压均匀性变差,导致图6(b)中200 s后均温板电池堆和普通电池堆电压波动率 C_v 的上升。此外,需要说明的是图6中电池堆电压和 C_v 的锯齿状波动是阳极

每30 s的周期性吹扫引起的。

图7所示为2个电池堆内部不同单电池在启动加载过程中的温度变化。随着负载电流的变化,单电池温度快速增加。从0 A至40 A的快速启动加载过程中,2个电池堆均呈现出位于电池堆中部的单电池温度高而两侧单电池温度低的分布规律。这归因于电池堆中部单电池散热条件较差容易引起热积累,而两侧单电池靠近端板并与环境直接接触,散热条件更好,温度更低。具体而言,在整个启动加载过程中均温板电池堆的单电池温度始终保持在52.5℃以内,而普通电池堆的最高单电池温度达到63.3℃。阴极开放式电池堆的最佳运行温度应保持在60℃以内,否则会导致质子交换膜脱水,引起热应力破坏。过高的工作温度是导致图6中普通电池堆在启动加载过程中性能较差的直接原因。这也证明了制造的均温板可将均温板电池堆保持在合理的工作温度范围内。

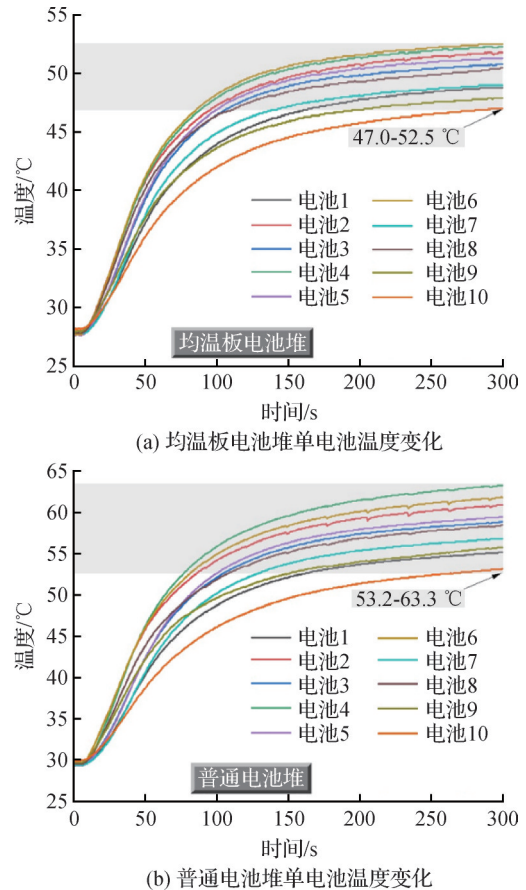


图7 启动加载过程中不同电池堆内单电池温度变化

Fig.7 Temperature changes in single cells within different stacks during the start-up loading process

启动加载过程中不同电池堆内单电池温度变化如图7所示。启动加载结束后,均温板电池堆内单电

池的温度逐渐趋于稳定一致,而普通电池堆内不同单电池间的温度差异逐渐增大。如图7中矩形阴影区域所示,在300 s测试结束时,均温板电池堆内10个单电池温度在47.0~52.5 °C变化,单电池间最大温差为5.5 °C,而普通电池堆单电池温度波动区间则为53.2~63.3 °C,单电池间最大温差为10.1 °C。过高的运行温度导致图6(a)中普通电池堆电压比均温板电池堆电压低21.7%。这再一次说明了对燃料电池堆采取有效热管理的必要性。

5 结论

为改善PEMFC电池堆的热管理,本文提出了将被动传热单元—均温板集成至阴极开放式燃料电池堆的设计,分别开展了单一均温板热性能测试及集成均温板电池堆启动加载实验研究,得出如下结论:

1)设计均温板在蒸发端热流密度仅为0.052 W/cm²即可被驱动运行,并且在加热功率为48 W时热阻仅为0.054 °C/W,具有良好的热响应和传热能力。

2)将均温板集成至电池堆后可快速散出电化学反应产热并使电池堆保持良好的温度均匀性,负载电流为40 A(电流密度为0.65 A/cm²)的稳态运行期间,电池堆内单电池间的最大温度差均保持在6 °C以下,有效避免了电池堆因热管理不当而导致的性能衰减。

虽然本研究所用电池堆功率较小,但验证了基于均温板的被动式热管理的可行性,为车用燃料电池堆热管理设计优化提供了参考,未来工作将进一步研究高热流密度以及严寒等极端工况下集成均温板的大功率车用燃料电池堆的实际运行特性。

参考文献

- [1] 衣宝廉. 燃料电池和燃料电池车发展历程及技术现状 [M]. 北京: 科学出版社, 2018. (Yi Baolian. Development history and technical status of fuel cells and fuel cell vehicles [M]. Beijing: Science Press, 2018.)
- [2] Barbir F. PEM fuel cells: theory and practice [M]. Amsterdam Boston: Elsevier Academic Press, 2013.
- [3] 谭丕强, 刘晓扬, 杨晓美, 等. 车用燃料电池热管理技术的研究进展[J]. 太阳能学报, 2025, 46(9): 390-398. (Tan Piqiang, Liu Xiaoyang, Yang Xiaomei, et al. Research progress of thermal management for automotive fuel cells [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025, 46(9): 390-398.)
- [4] Huang Yicheng, Xiao Xuelian, Kang Huifang, et al. Thermal management of polymer electrolyte membrane fuel cells: a critical review of heat transfer mechanisms, cooling approaches, and advanced cooling techniques analysis [J]. Energy Conversion and Management, 2022, 254: 115221.
- [5] Chen Qin, Zhang Guobin, Zhang Xuzhong, et al. Thermal management of polymer electrolyte membrane fuel cells: a review of cooling methods, material properties, and durability [J]. Applied Energy, 2021, 286: 116496.
- [6] Faghri A, Guo Zhen. Integration of heat pipe into fuel cell technology [J]. Heat Transfer Engineering, 2008, 29(3): 232-238.
- [7] Sun Shimei, Zheng Liqiu. Numerical simulation study on heat pipe cooling system of proton exchange membrane fuel cell [J]. Advanced Materials Research, 2011, 347-353: 893-896.
- [8] 赵晶. 质子交换膜燃料电池热质传递特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021. (Zhao Jing. Research on heat and mass transfer characteristics of proton exchange membrane fuel cell [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.)
- [9] Rashidi S, Karimi N, Sundén B, et al. Progress and challenges on the thermal management of electrochemical energy conversion and storage technologies: fuel cells, electrolyzers, and supercapacitors [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2022, 88: 100966.
- [10] Li Qinghe, Liu Zhiqiang, Sun Yi, et al. A review on temperature control of proton exchange membrane fuel cells [J]. Processes, 2021, 9(2): 1-21.
- [11] Reay D A, Kew P A, Mcglen R J. Heat pipes: theory, design and applications [M]. 6th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013, 3(19): 311-319.
- [12] Tetuko A P, Shabani B, Andrews J. Thermal coupling of PEM fuel cell and metal hydride hydrogen storage using heat pipes [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(7): 4264-4277.
- [13] Chang J Y, Prasher R S, Prstic S, et al. Evaporative thermal performance of vapor chambers under nonuniform heating conditions [J]. Journal of Heat Transfer, 2008, 130(12): 121501.
- [14] Ferrandi C, Iorizzo F, Mameli M, et al. Lumped parameter model of sintered heat pipe: transient numerical analysis and validation [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 50(1): 1280-1290.
- [15] Shah R K, London A L. Laminar flow forced convection in ducts [J]. Journal of Fluids Engineering, 1978, 102(2): 431-455.
- [16] Tang Yong, Tang Heng, Li Jie, et al. Experimental investigation of capillary force in a novel sintered copper mesh wick for ultra-thin heat pipes [J]. Applied Thermal

Engineering, 2017, 115: 1020–1030.

- [17] Bai Xingying, Jian Qifei, Huang Bi, et al. Hydrogen starvation mitigation strategies during the start-up of proton exchange membrane fuel cell stack [J]. Journal of Power Sources, 2022, 520: 230809.
- [18] Li Yong, Li Zixi, Zhou Wenjie, et al. Experimental investigation of vapor chambers with different wick structures at various parameters [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016, 77: 132–143.

通信作者简介

柏兴应,男,博士,中国电器科学研究院股份有限公司,020-32369805, E-mail: baixingy@cei1958.com。研究方向:新能源动力装备热质传递机理。

About the corresponding author

Bai Xingying, male, Ph. D., China National Electric Apparatus Research Institute Co., Ltd., 86-20-32369805, E-mail: baixingy@cei1958.com. Research fields: heat and mass transfer mechanisms in energy power equipment.

(责任编辑:田甜)