

换热器结构对氢燃料电池冷起动性能影响的仿真分析

刘洋洋¹, 崔万鑫², 鲍尊俊¹, 张黍涵¹, 孔祥安¹, 吕承举³,
陈忠言⁴, 李新海^{1*}

1. 山东建筑大学机电工程学院, 山东 济南 250101; 2. 中国重型汽车集团有限公司, 山东 济南 250101;
3. 山东省交通科学研究院, 山东 济南 250031; 4. 山东氢探新能源科技有限公司, 山东 济南 250109

摘要:为解决质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)在超低温环境下起动困难的问题,提出解决氢燃料电池冷起动困难问题的方案,通过氢燃烧器产生高温燃气,经换热器加热冷却液,由冷却液小循环提高电堆温度,以缩短冷起动时间,提高燃料电池冷起动性能。采用计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)方法,基于 AVL_FIRE 软件建立管壳式换热器三维仿真模型,对换热器换热性能进行数值分析与迭代优化;针对初始模型换热效率低、冷却液温度分布不均等问题,提出缩短换热器进出口长度并调整铜管分布、增设挡板改变气流路径、增大流体进口管径、减小换热器长度削除尾部低效换热区域等4种优化方案。仿真结果显示:第4种优化方案使冷却液出口温度较进口温度提高36 K,满足冷起动系统对冷却液温升的要求,为最佳选择方案。

关键词:质子交换膜燃料电池;低温冷起动;换热器;数值仿真

中图分类号: TM911

文献标志码: A

文章编号: 1673-6397(2025)05-0046-09

引用格式: 刘洋洋, 崔万鑫, 鲍尊俊, 等. 换热器结构对氢燃料电池冷起动性能影响的仿真分析[J]. 内燃机与动力装置, 2025, 42(5): 46-54.

LIU Yangyang, CUI Wanxin, BAO Zunjun, et al. Simulation analysis of hydrogen fuel cell heat exchanger structure on cold start performance[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(5): 46-54.

0 引言

氢燃料电池发电是利用氢气与氧气通过电化学反应将化学能直接转化为电能的清洁能量转换过程。氢气作为唯一燃料时,氢燃料电池的最终产物仅为水,且水在燃料电池内以气态、液态共存。燃料电池低温起动时,若环境温度低于0℃,电堆内的水凝结成冰,阻碍反应正常进行,燃料电池系统的整体性能急剧下降,严重时可能导致燃料电池丧失正常起动能力;水结冰后还造成电池体积膨胀,可能对电堆组件的精细结构和性能造成难以逆转的破坏^[1-2]。

针对燃料电池低温起动困难问题,目前主要采用停机吹扫工艺降低系统含水量及辅助加热两种技术路径提高燃料电池温度。停机吹扫虽能降低结冰风险,但无法彻底清除水分且在环境温度极低时效果不佳,因此需采用辅助加热方式以保障燃料电池在低温环境下的顺利起动。根据能量来源,加热方式分为主动式(外部能量输入)和被动式(内部能量利用)两类,目前工业应用中通常采用主动式加热方式。研

收稿日期:2025-08-19

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2021QE065)

第一作者简介:刘洋洋(1998—),男,河南鹿邑人,硕士研究生,主要研究方向为氢燃料电池冷起动,E-mail:17625523226@163.com。

*通信作者简介:李新海(1989—),男,济南人,工学博士,副研究员,主要研究方向为氢燃料电池电堆系统及关键部件技术,E-mail:lixinhai19@sdjz.edu.cn。

究人员采用多种技术解决燃料电池低温起动难问题;Li等^[3]开发了一种嵌入式电加热系统,通过在阴极气体扩散层集成加热元件使膜电极快速升温,该方法可使加热元件功率密度达 1.5 kW/cm^2 ,具有热响应迅速的优势,但存在因局部过热导致膜材料损伤的风险;Zhan等^[4]采用同步加热端板和进气部分的分级预热策略,将燃料电池起动时间缩短了40%;Hu等^[5]采用端板辅助加热方式,可使环境温度高于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的起动时间不超过30 s,且经过20次循环测试后,电堆电压相对偏差小于5%,仍保持优良的电压一致性;Gießgen等^[6]的模拟研究指出,相比内部加热方式,外部预热方式虽可扩展起动温度下限,但其升温速率降低了一个数量级,建议采用内外结合的混合加热模式以实现最优起动性能。

空气加热响应速度快,但空气的比热容为 $1.01\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$,冷却液的比热容为 $4.18\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$,显然冷却液热容特性更高,其作为储热和传热介质时,能够携带和输送更多热量,工业界普遍采用冷却液加热,该技术通过冷却液强制循环实现电堆均匀受热,使电池组电压偏差小于3%,有效提高电池组电压一致性^[7]。关于冷却液对低温冷起动性能影响的研究较多。Wei等^[8]构建了三维瞬态传热模型,系统研究了冷却参数对起动性能的影响,仿真结果表明:增大冷却液流量或槽体容积对输出电压影响较小(电压波动小于5%),但轴向温度梯度加剧,电池最大温差可达 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$,这种不均匀性会造成电池物理结构损伤,从而导致电化学性能衰退;提高冷却液流速能改善电流分布均匀性,但导致冰晶积聚质量增加,并改变冰晶在电池内部空间分布特征。Luo等^[9]通过燃料电池汽车在环境温度为 -20 、 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的冷起动试验,验证了冷却液辅助加热的工程可行性,使燃料电池在环境温度为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的极寒条件下成功起动。宋东方等^[10]研究表明:未加装预热系统时,电堆在环境温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时仅能正常运行100 s;加装集成流道加热器后,电堆的低温起动温度极限可扩展至 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$,且起动电流与升温时间呈负相关。周荣良^[11]研究表明,流速与除冰效率正相关(Pearson因数为0.85)。李友才等^[12]通过多参数试验发现,加热功率和冷却液流量均与升温速率呈线性关系;若冷却液预保温至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,当环境温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,电堆温度从 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时间为648 s,比直接将电堆加热到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时间缩短264 s。

综上所述,采用外部辅助加热并结合大功率电加热器,可有效缩短燃料电池低温冷起动时间并提高低温起动能力。受加热器功率限制,该策略在冷起动时间和起动温度方面仍存在瓶颈。在超低温环境中,燃料电池难以实现内部给加热器供电,需依赖外部电能。氢气燃烧器仅需火花塞点火能量,无需外部电能持续供电,并可在短时间内释放大量热量,弥补了电加热器的不足^[13]。当前关于氢气燃烧器、换热器和燃料电池冷起动系统相结合的研究较少,燃料电池冷起动系统有待深入研究。本文中主要对质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cells, PEMFC)冷起动系统关键部件(换热器)进行结构选型和仿真分析,基于仿真结果优化换热器尺寸、结构,分析不同优化方案对换热器换热效果的影响,最终确定最佳换热器结构参数。

1 模型框架

本文中基于氢气燃烧器及小循环换热方式,设计氢燃料电池低温快速冷起动方案及运行模式。氢燃料电池冷起动系统框架如图1所示。

燃料电池冷起动系统包括氢气循环回路、空气循环回路、冷却液循环回路3个主要子系统。冷却液循环模式包括小循环、大循环、小循环加热3种模式,通过三通电磁阀实现3种模式切换。电堆正常起动过程中,在起动初始阶段通过小循环模式使电堆更快达到最佳工作温度,提高起动效率;电堆达到正常工作温度或高负载运行散热量较大时,采用大循环模式的散热器能够及时将电堆产生的多余热量散发出去,以保证电堆在高负载下稳定运行;低温冷起动过程采用小循环加热模式,换热器、氢气燃烧器等作为冷起动辅助部件布置在冷却管路小循环中,当环境温度低于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,通过控制单元控制氢气管路、空气管路的三通阀调节流经燃烧器的氢气与空气质量流量,实现氢气燃烧器的燃料供应,调节燃烧器的产热量,将燃烧器产生的热量通过换热器传递到冷却液,结合冷却液小循环管路将热量送至电堆内部,该模式充分利用外部辅助加热能量,快速提高电堆温度,确保电堆在极寒条件下顺利起动。

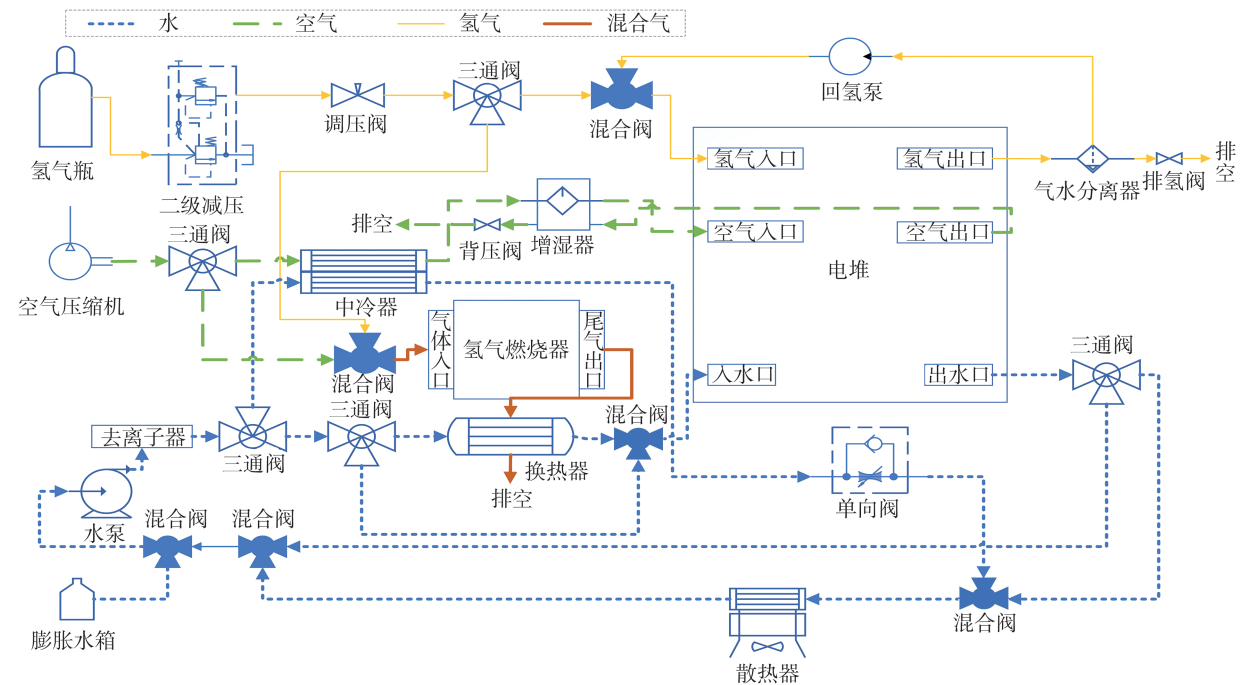


图 1 氢燃料电池冷起动系统框架图

2 换热器建模及模型验证

2.1 换热器结构设计

本文中设计了一款专用于氢燃料电池低温冷起动系统的管壳式换热器,氢气燃烧器与换热器装配如图 2 所示。氢气与空气在氢气燃烧器内混合燃烧产生高温热流体(气态),通过换热器将燃烧器产生的热量传递给冷却液,由冷却液小循环将热量输送到燃料电池内部,使电堆快速升温,直至达到正常起动温度。换热器上方较大的接口为热流体入口,氢气燃烧器燃烧产生的高温尾气由此进入,流经管壳式换热器内部后,由下方左侧热流体出口排出;换热器上方右侧较小的接口为冷流体入口,燃料电池的冷却液由此进入,经换热器内部的铜管换热后,温度升高,由下方冷却液出口流入燃料电池内部,实现电堆升温。

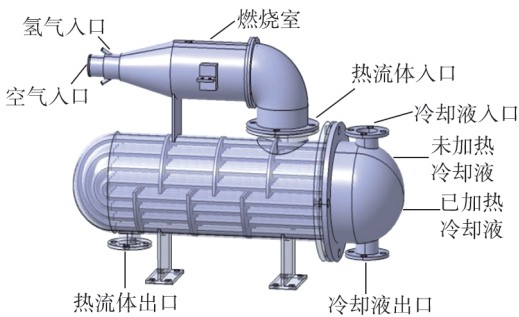


图 2 氢气燃烧器与换热器装配示意图

2.2 换热器仿真模型建立

采用 AVL_FIRE 软件对换热器进行计算流体动力学(computational fluid dynamics,CFD)仿真,分析管壳式换热器应用效果,并依据仿真结果优化换热器设计,提高换热效率。由于管壳式换热器外壳部分对换热效率影响很小,因此本文中只针对换热器内部的流体域(气体域、液体域)和换热铜管进行仿真分析,换热器仿真模型如图 3 所示。

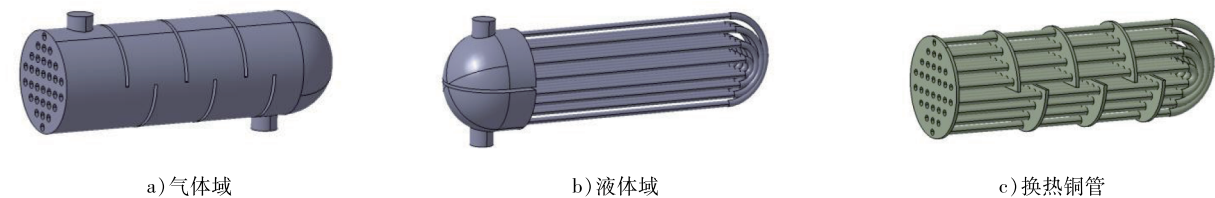


图 3 换热器仿真模型

2.3 条件参数

根据 Cui 等^[14]提出的氢气燃烧器的出口边界条件,设置热流体入口质量流量为 20 g/s,入口温度为 2 000 K;冷却液入口体积流量为 20 L/min,入口温度为 293.15 K;热流体出口和冷却液出口压力均为 100 kPa;电堆功率为 45 kW,换热器材质为铜管,导热系数为 100 W/(m·K)。本文中设计的管壳式换热器的铜管内径为 10 mm、壁厚为 1 mm,换热铜管数为 32,单根换热铜管长度为 405 mm。

2.4 模型验证

基于管壳式换热器数学计算模型^[15-17]、边界条件及换热器尺寸,采用对数平均温差法计算各参数,验证仿真模型的有效性。为了简化计算模型,忽略影响较小的因素(如换热器的散热损失),假定流体在换热器的流动为稳定流动,传热过程为稳态传热,传热系数为定值,流体的物性参数(如比热容、导热系数等)为常数,热流体和冷流体的比定压热容分别为 1.379×10^3 、 4.200×10^3 J/(kg·K)。

根据换热器参数及边界条件,计算冷流体、热流体对应的雷诺数

$$Re_j = u_j d / \nu_j, \quad (1)$$

式中: $j=1,2$,分别对应冷流体、热流体; u_j 为流体流速,m/s; d 为管内径,m; ν_j 为运动黏度,m²/s。

冷流体、热流体对应的普朗特数

$$Pr_j = c_{p,j} \mu_j / \lambda, \quad (2)$$

式中: $c_{p,j}$ 为流体的比定压热容,J/(kg·K); μ_j 为基于流体平均温度确定的动力黏度,Pa·s; λ 为管壁材料导热系数,W/(m²·K)。

换热器铜管内、外流体对应的努赛尔数

$$Nu_l = h_l d / \lambda, \quad (3)$$

式中: $l=1,2$,分别对应管内、管外流体; h_l 为流体对流传热系数,W/(m²·K)。

管内流体对应的努赛尔数

$$Nu_1 = 0.023 Re_1^{0.8} Pr_1^n, \quad (4)$$

式中:管内流体加热时, $n=0.4$;管内流体冷却时, $n=0.3$ 。

管外流体对应的努赛尔数

$$Nu_2 = C Re_2^b Pr_2^{1/3} (\mu_2 / \mu_w)^{0.14}, \quad (5)$$

式中: μ_w 为基于管壁温度确定的动力黏度; C 、 b 为与管束排列有关的常数。

采用式(1)(2)(3)(4)计算管内流体对流传热系数 h_1 ,采用式(1)(2)(3)(5)计算管外流体对流传热系数 h_2 。

以 W/(m²·K) 为单位的换热器总传热系数 K 的数值^[18]

$$\{K\} = 1 / \left(\frac{1}{\{h_1\}} + \frac{\{\delta\}}{\{\lambda\}} + \frac{1}{\{h_2\}} \right), \quad (6)$$

式中: $\{\delta\}$ 为以 m 为单位的管壁厚度 δ 的数值; $\{h_1\}$ 、 $\{h_2\}$ 分别为以 W/(m²·K) 为单位的 h_1 、 h_2 的数值, $\{\lambda\}$ 为 λ 的数值。

计算冷流体、热流体出口温度时引入中间变量 R 、 N ,计算式为:

$$R = q_{m,1} c_{p,1} / (q_{m,2} c_{p,2}), \quad (7)$$

$$N = KA / (q_{m,1} c_{p,1}), \quad (8)$$

式中: $q_{m,1}$ 、 $q_{m,2}$ 分别为冷流体、热流体的质量流量,kg/s; A 为换热器换热面积,m²。

根据能量守恒定律,

$$q_{m,2} c_{p,2} (t_{2,in} - t_{2,out}) = q_{m,1} c_{p,1} (t_{1,out} - t_{1,in}) = \eta_v, \quad (9)$$

式中: $t_{1,out}$ 、 $t_{2,out}$ 分别为冷流体、热流体出口温度,℃; $t_{1,in}$ 、 $t_{2,in}$ 分别为冷流体、热流体入口温度,℃; η_v 为换热器壁面传热速率,J/s。

根据式(7)(8)(9)分析冷流体出口温度 $t_{1,out}$ 、热流体出口温度 $t_{2,out}$ 的比例关系为:

$$t_{1,out} = \frac{t_{2,in}(1 - e^{-N(R-1)}) - (R-1)t_{1,in}}{R - e^{-N(R-1)}}, \quad (10)$$

$$t_{2,out} = t_{1,in} - \frac{q_{m,1}c_{p,1}}{q_{m,2}c_{p,2}}(t_{1,out} - t_{1,in}). \quad (11)$$

对数平均温差

$$\Delta t_m = (\Delta t_1 - \Delta t_2) / \ln(\Delta t_1 / \Delta t_2), \quad (12)$$

式中: $\Delta t_1 = t_{2,in} - t_{1,out}$, $\Delta t_2 = t_{2,out} - t_{1,in}$ 。

$$\eta_v = KA\Delta t_m. \quad (13)$$

模型仿真和根据式(6)~(13)计算得出的冷却液流量与冷却液出口温度的曲线对比如图4所示。由图4可知:冷却液流量为2 L/min时,冷却液出口温度理论计算与模型仿真结果误差最大,为3.26%;不同冷却液流量下,冷却液出口温度理论计算与模型仿真结果的平均相对误差为1.20%,误差均在允许范围内(不大于5%),本文中所建管壳式换热器仿真模型有效。

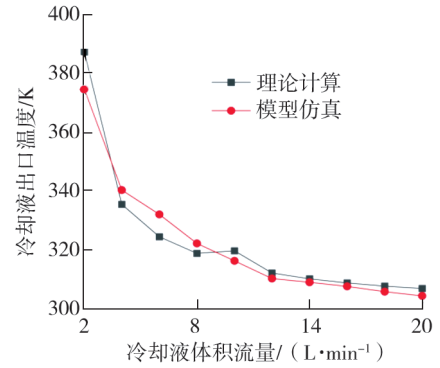


图4 理论计算与模型仿真对比结果

3 结果分析

3.1 结构对换热效果的影响

基于管壳式换热器的特点,结合氢气燃烧器,确定适用于氢燃料电池低温冷起动的管壳式换热器初始模型,采用 AVL_FIRE 软件分析换热器初始模型仿真结果如图5所示。

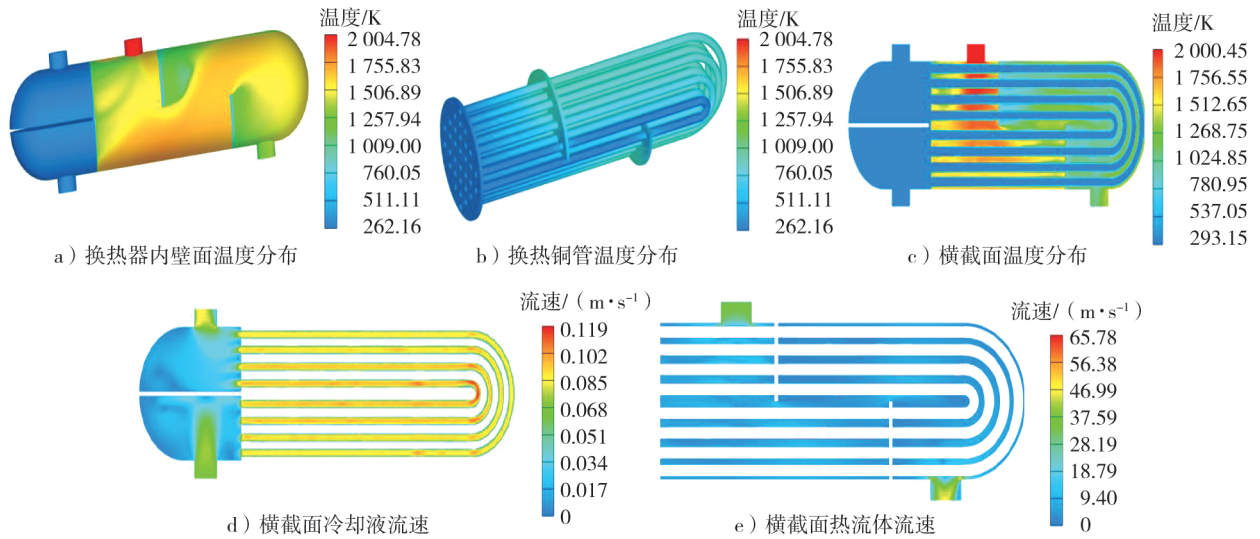


图5 管壳式换热器初始模型仿真结果

由图5可知:换热器铜管平均温度约为700 K,冷却液进、出口温度变化不大,换热器整体换热效果一般。分析原因:冷却液进、出口端过长,体积过大,冷却液含量多,同时换热铜管管径较大,降低了铜管分布密度,导致冷却液进、出口温升变化不大。

3.2 管壳式换热器优化

为解决初始模型中换热效率低、铜管温度分布不均导致冷却液加热效果差等问题,针对氢燃料电池低温冷起动系统对冷却液温升的需求(电堆温度需从253.15 K升高至273.15 K,冷却液出口温度较冷却液入口温度的温升应大于20 K),从换热器结构布局、冷却液流动控制、换热器几何参数3方面优化迭代管壳式换热器结构,其中结构布局方面缩短冷却液进出口长度、调整换热铜管分布密度;流动控制方面增

设挡板改变气流路径、延长流体停留时间;几何参数方面优化管径尺寸、缩短整体长度以减少无效换热区域。设计 4 种优化方案,记为优化方案一至优化方案四。各方案分别为缩短冷却液进、出口端长度,减小铜管管径,增加铜管分布;增设内部挡板,改变气流路径;增大热流体进口管径,减少挡板数量;减小换热器长度,移除尾部低效换热区域。

4 种换热器优化方案仿真模型如图 6 所示,图中红色方框部分为优化部位。

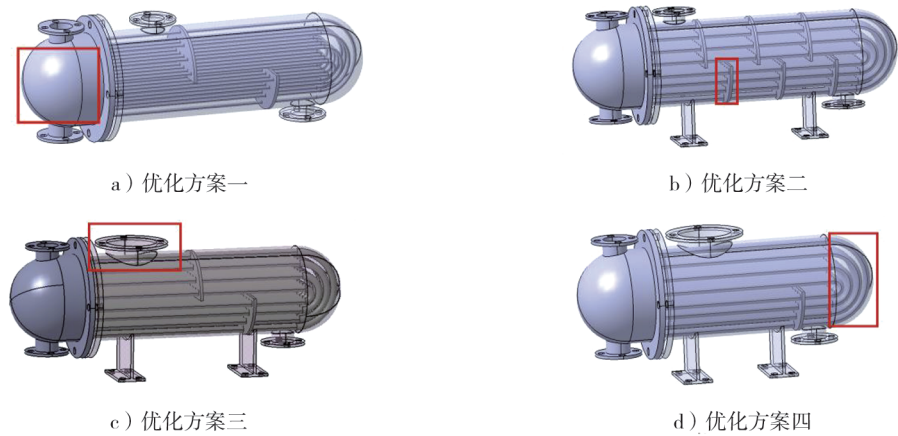


图 6 4 种管壳式换热器优化方案仿真模型

从换热器内壁面温度分布、换热铜管温度分布、冷却液温度分布、横截面冷却液温度分布、横截面冷却液流速、横截面热流体流速 6 方面分析 4 种优化方案换热器温升效果。各优化方案仿真结果如图 7 所示。

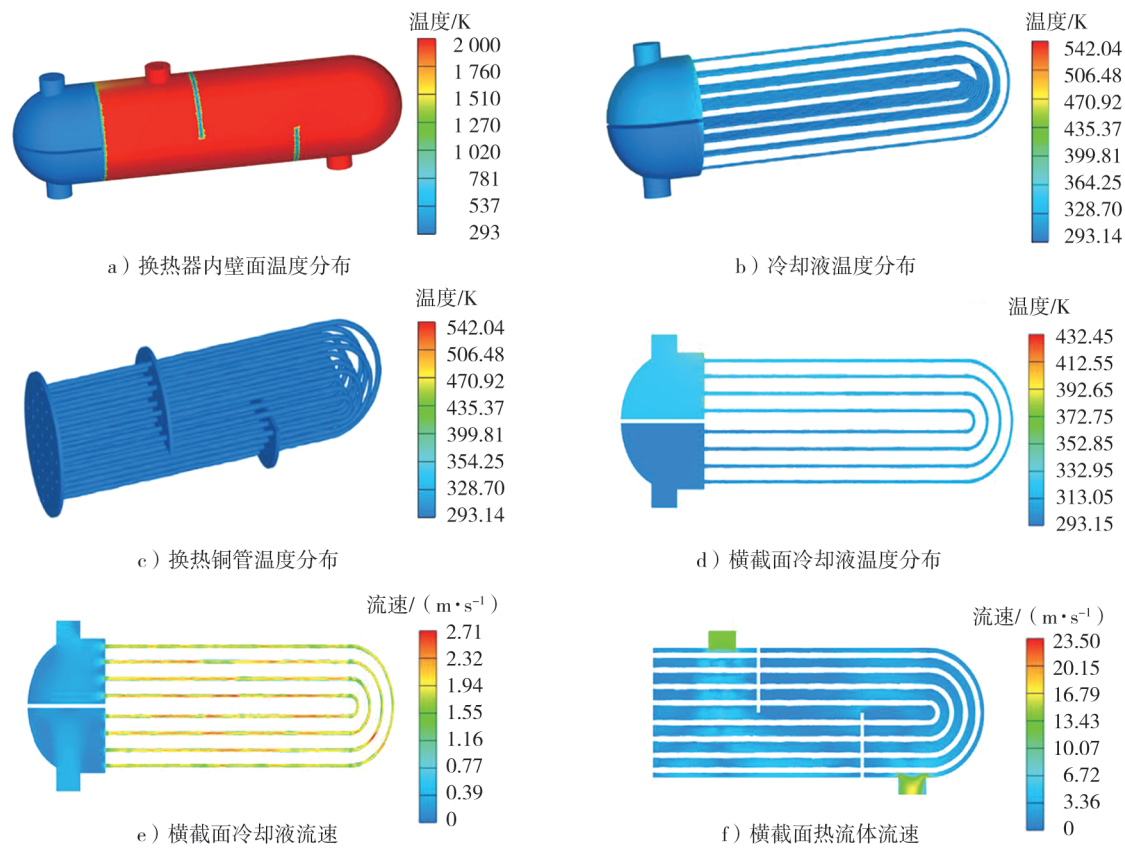


图 7 管壳式换热器优化方案一仿真结果

由图 7 可知:采用优化方案一,热流体大部分热量传递到冷却液中,换热器进出口温度变化不大;换热铜管温度几乎无变化;冷却液出口温度较冷却液进口温度仅升高了约 10 K,不满足电堆升温要求。

优化方案二仿真结果如图 8 所示。

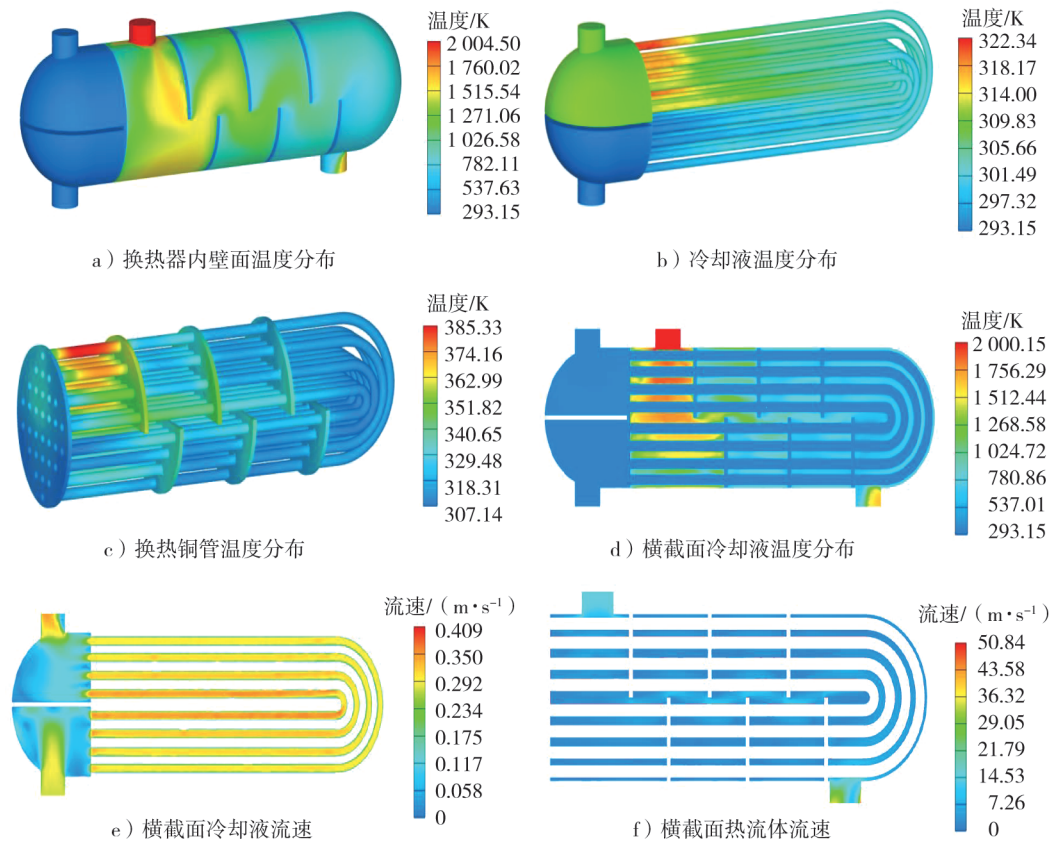
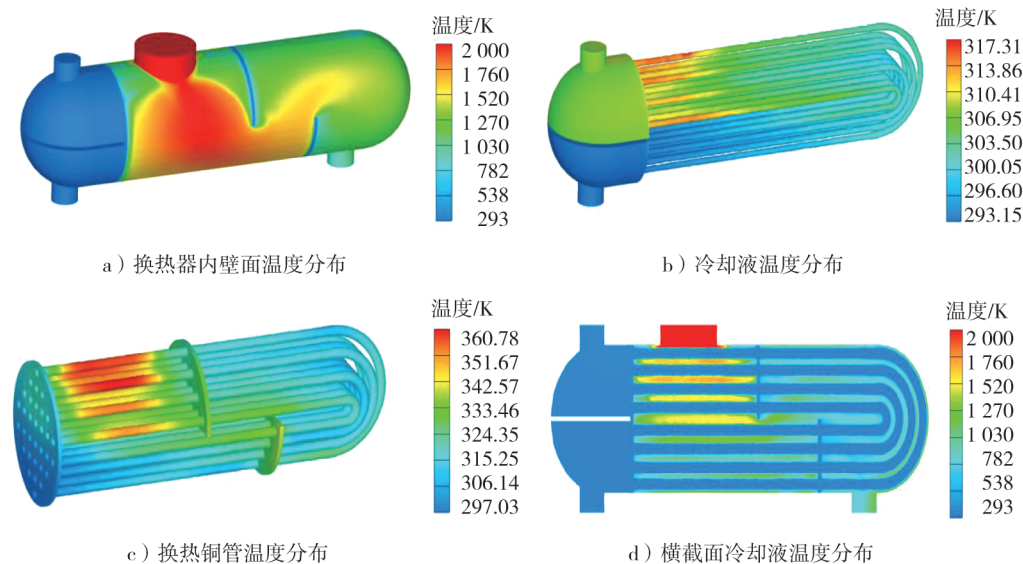


图 8 管壳式换热器优化方案二仿真结果

由图 8 可知:采用优化方案二,增加挡板支架改变热流体流向,使热流体在换热器内停留的时间增长,但换热器尾部区域温度约为 310 K,温度下降较多,不能明显提高换热器尾部冷却液温升效果,出口冷却液温度约为 309 K,铜管对冷却液的加热效果较差,不满足冷却液温升大于 20 K 的要求。

优化方案三仿真结果如图 9 所示。



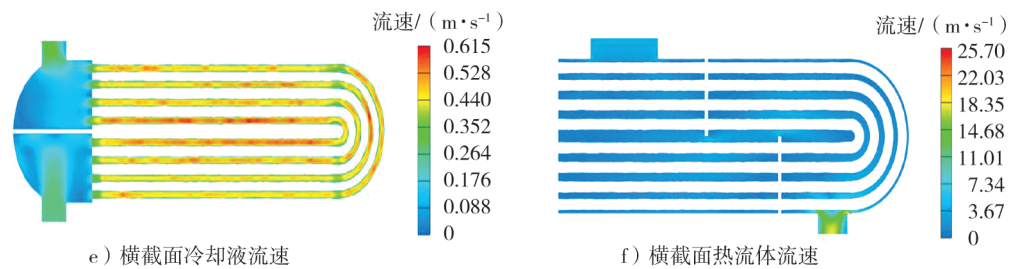


图 9 管壳式换热器优化方案三仿真结果

由图 9 可知:采用优化方案三,增大热流体侧进口管径,换热器铜管经热流体流过后,铜管温度在 330 K 以上的面积虽然大于优化方案二,可以提高一定的换热效果,但冷却液出口温度约为 305 K,仍不满足电堆温升要求。

优化方案四仿真结果如图 10 所示。

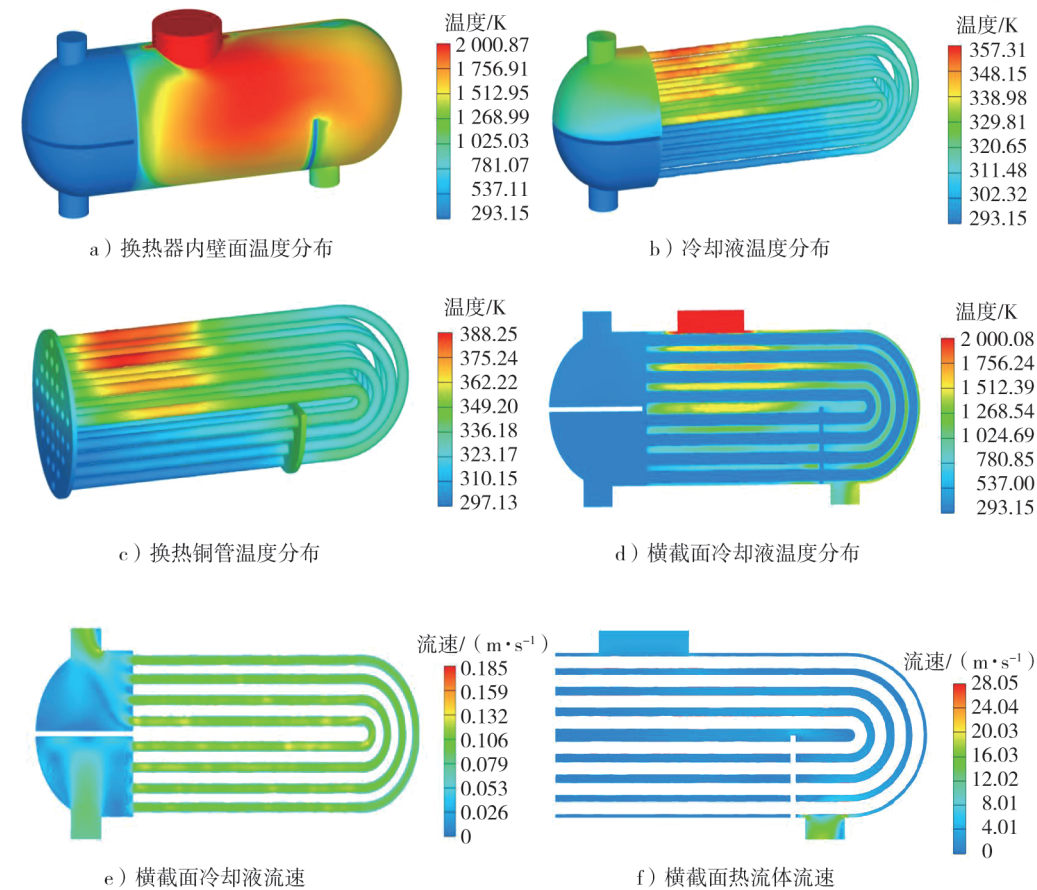


图 10 管壳式换热器优化方案四仿真结果

由图 10 可知:采用优化方案四,换热器内部整体温度较高,换热器冷却液出口温度约为 329 K,较冷却液进口温度(293.15 K)约提高了 36 K,满足氢燃料电池低温冷起动系统温升要求,优化方案四为最佳优化方案。

4 结论

本文中设计了氢燃料电池低温冷起动系统中的换热器结构参数,并对其开展建模仿真及优化分析,旨在为提高换热器换热效果提供参考,主要研究内容如下。

1) 设计了一款专用于氢燃料电池低温冷启动系统的管壳式换热器,该换热器与氢气燃烧器结合,实现冷却液小循环加热模式,显著提高燃料电池低温冷启动性能。

2) 采用 AVL_FIRE 软件建立包含气-液-固三相的 CFD 仿真模型,重点仿真分析换热器内部换热铜管和流体域温度变化,根据实际工况设置边界条件及相关参数。不同冷却液流量下,冷却液出口温度理论计算与模型仿真结果的平均相对误差为 1.20%,验证了仿真结果的可靠性。

3) 针对初始模型换热效率低、冷却液温升效果差等问题,提出 4 种优化方案:方案一优化换热管进、出口长度与铜管分布,使冷却液出口温度较进口温度升高约 10 K;方案二调整挡板数,使出口温度达 309 K;方案三改进进气结构,使冷却液出口温度升高至 305 K;方案四缩短换热器长度,冷却液出口温度较进口温度升高约 36 K。优化方案四满足冷启动系统冷却液温升大于 20 K 的需求,为满足低温冷启动要求的管壳式换热器结构最佳设计方案,为氢燃料电池在环境温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的可靠启动提供了有效的热管理解决方案。

参考文献:

- [1] REN P, PEI P C, LI Y H, et al. Degradation mechanisms of proton exchange membrane fuel cell under typical automotive operating conditions[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2020, 80: 100859.
- [2] 崔万鑫, 商显上, 王璐, 等. 氢燃料电池复合流场中气-液传输对极化特性的影响[J]. 内燃机与动力装置, 2024, 41(4): 11-19.
- [3] LI L J, WANG S X, YUE L K, et al. Cold-start method for proton-exchange membrane fuel cells based on locally heating the cathode[J]. Applied Energy, 2019, 254: 113716.
- [4] ZHAN Z G, YUAN C, HU Z R, et al. Experimental study on different preheating methods for the cold-start of PEMFC stacks[J]. Energy, 2018, 162: 1029-1040.
- [5] HU K F, CHU T K, LI F, et al. Effect of different control strategies on rapid cold start-up of a 30-cell proton exchange membrane fuel cell stack[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(62): 31788-31797.
- [6] GIEßGEN T, JAHNKE T. Assisted cold start of a PEMFC with a thermochemical preheater: a numerical study[J]. Applied Energy, 2023, 331: 120387.
- [7] 季玮琛, 林瑞. 质子交换膜燃料电池冷启动研究及策略优化现状[J]. 科学通报, 2022, 67(19): 2241-2257.
- [8] WEI L, LIAO Z H, SUO Z B, et al. Numerical study of cold start performance of proton exchange membrane fuel cell with coolant circulation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(39): 22160-22172.
- [9] LUO M Z, ZHANG J, ZHANG C Z, et al. Cold start investigation of fuel cell vehicles with coolant preheating strategy[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 201: 117816.
- [10] 宋东方, 武照云, 李丽. 燃料电池汽车冷启动预热性能研究[J]. 机械设计与制造, 2023(9): 59-63.
- [11] 周荣良. 质子交换膜燃料电池与热管理系统仿真研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- [12] 李友才, 许思传, 杨宗田, 等. 燃料电池电堆冷却液加热的实验研究[J]. 电源技术, 2015, 39(7): 1408-1410.
- [13] DUBBE H, HOLL E, SPIERINGS A, et al. Development of a spatially uniform low-temperature hydrogen combustor[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2018, 19(10): 735-745.
- [14] CUI W X, LI X H, ZHANG P J, et al. Hydrogen burners for the cold start process of hydrogen fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2025, 629: 235968.
- [15] DANILOVA V, SHLYKOV V, KOTOVSKIY V, et al. Modelling of heat transfer processes in heat exchangers for cardiopulmonary bypass[J]. Mathematics, 2021, 9(23): 3125.
- [16] SONG M J, JIANG Z Y, DANG C B, et al. Mathematical modeling investigation on flow boiling and high efficiency heat dissipation of two rectangular radial microchannel heat exchangers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 190: 122736.
- [17] JIANG Z Y, SONG M J, DANG C B, et al. Two mathematical models of flow boiling and flow instability in rectangular expanding microchannel heat exchangers and structure optimization[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 228: 120483.
- [18] 陈增良, 徐伟胜, 丁晨, 等. 管壳式换热器换热管强化传热研究[J]. 化工设备与管道, 2024, 61(4): 19-30.

(下转第 67 页)

range, leading to bidirectional bending fatigue failure at the blade root. By maintaining the fan diameter unchanged and increasing the hub thickness by 2 mm, the first-order modal frequency of the fan is raised from 108 Hz to 150 Hz. The improved fan doesn't break after a 500 h durability test, which indicates that the improvement measures are effective. In the design of rotating machinery systems, it is crucial to control the coupling relationship between the modal frequencies of key components and excitation frequencies. Optimizing structural parameters to adjust modal distribution can mitigate resonance risks while ensuring performance.

Keywords: fan; modal analysis; spectral analysis; resonance characteristic

(责任编辑:臧发业)

.....
(上接第 54 页)

Simulation analysis of hydrogen fuel cell heat exchanger structure on cold start performance

LIU Yangyang¹, CUI Wanxin², BAO Zunjun¹, ZHANG Shuhan¹,
KONG Xiang'an¹, LÜ Chengju³, CHEN Zhongyan⁴, LI Xinhai^{1*}

1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. China National Heavy Duty Truck Group, Co., Ltd., Jinan 250101, China;

3. Shandong Transportation Research Institute, Jinan 250031, China;

4. Shandong Fuel Cell Power in Technology Co., Ltd., Jinan 250109, China

Abstract: To solve the problem of difficult start of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) in ultra-low temperature environment, a solution to the difficult cold startup of hydrogen cells is proposed. By generating high-temperature gas with a hydrogen burner, the coolant is heated by a heat exchanger, and the stack temperature is improved by a small cycle coolant to reduce the cold startup time and improve the cold startup performance of fuel cells. The computational fluid dynamics (CFD) method is used to establish a three-dimensional model of the shell-and-tube heat exchanger based on AVL_FIRE software, and the heat exchange performance of the heat exchanger is numerically analyzed. In view of the low heat exchange efficiency and uneven temperature distribution of the initial model, four optimization schemes are proposed, including shortening the length of the heat exchanger inlet and adjusting the distribution of copper tubes, setting baffles to change the airflow path, increasing the diameter of the fluid inlet pipe, and reducing the length of the heat exchanger to eliminate the low-efficiency heat exchange area at the tail. The simulation results show that the fourth optimization scheme increases the temperature of outlet cooling water by 36 K compared with the inlet temperature, which meets the requirements of the cold start system for the temperature rise of the cooling water and is the best option.

Keywords: proton exchange membrane fuel cell (PEMFC); low-temperature cold start; heat exchanger; numerical simulation

(责任编辑:胡晓燕)