

# 燃料电池发动机供氢系统设计与分析

刘黎明<sup>1</sup>,任冲冲<sup>2</sup>,刘敏<sup>2</sup>,王桂华<sup>1</sup>,白书战<sup>1\*</sup>,李国祥<sup>1</sup>

1. 山东大学核科学与能源动力学院, 山东 济南 250061; 2. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061

**摘要:**分析流通、闭端、循环三种供氢系统布置方式的特点,针对功率为150 kW的氢燃料电池电堆,对循环式供氢系统布置方案进行改进设计,搭建燃料电池发动机系统仿真模型,运用正交试验设计方法,对9种不同的电池工作状态进行仿真计算分析,探讨循环泵的转速、排气周期和排气时间对燃料电池系统性能的影响。仿真结果表明,燃料电池阳极处氮气的体积分数随电流增大而增大;循环泵转速对电堆阳极氮气体积分数没有影响;当排气周期小于10 s时,排气时间应适当减小,当排气周期大于20 s时,排气时间应适当增大;阳极氢气体积流量随电流增大而增大,氢气过量比随电流增大而减小。

**关键词:**氢燃料电池;氢气循环系统;阳极;仿真模拟

**中图分类号:** TM911.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-6397(2024)06-0046-08

**引用格式:** 刘黎明,任冲冲,刘敏,等. 燃料电池发动机供氢系统设计与分析[J]. 内燃机与动力装置,2024,41(6):46-53.

LIU Liming, REN Chongchong, LIU Min, et al. Design and analysis of hydrogen supply system for a fuel cell engine[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2024,41(6):46-53.

## 0 引言

能源短缺和环境污染等问题严重影响人们的生活并制约社会的发展。基于国家能源安全以及环境保护的要求,我国在2020年9月提出“双碳战略”目标,推进能源转型,降低现有能源结构中煤炭占比,提高可再生能源占比<sup>[1-2]</sup>。氢能具有燃料热值高、清洁无污染等优势,是应对能源危机和环境污染的绿色能源<sup>[3]</sup>。氢燃料电池通过电化学反应将氢的化学能直接转化成电能,相比传统的能源转化形式,氢燃料电池的转换效率较高,可达60%~70%。在节能减排的大背景下,氢燃料电池凭借热值高、效率高、清洁无污染等优势,发展速度越来越快<sup>[4]</sup>。

燃料电池电堆是燃料电池发动机系统的核心,电堆内部涉及复杂的物理化学过程,为了研究电堆中传质、传热和电化学反应的工作机理,分析阴、阳极流体流动特性,制定高效的运行控制策略,近年来中外学者对其进行了仿真研究。Springer等<sup>[5]</sup>搭建一维稳态模型,研究了质子交换膜中水的传输机制对电池性能的影响,分析了电流密度、膜厚度、膜内阻之间的联系。在复杂流道配置中,电堆中物质的多维扩散和对流传热传质的相互作用往往不能忽略。Singh等<sup>[6]</sup>提出了单电池二维水热传输模型,综合考虑多孔电极扩散作用,液态水在电极和膜中的对流、电渗透作用,利用该模型研究了水的流动方式和孔隙率对电池性能的影响。Liu等<sup>[7-8]</sup>基于修正的Brinkman方程,建立了三维多相非等温的水热管理模型,设计了8种冷却方案,研究了阴极流动方向、阳极流动方向和冷却水流动方向对电池内部温度分布的影响,并使用

收稿日期:2024-09-20

基金项目:山东省重点研发计划项目(2020CXGC010404);济南市市校融合发展战略工程项目(JNSX2023006)

第一作者简介:刘黎明(2001—),男,济南人,硕士研究生,主要研究方向为质子交换膜燃料电池仿真研究,E-mail:486512098@qq.com。

\*通信作者简介:白书战(1979—),男,山东莘县人,工学博士,教授,主要研究方向为内燃机燃烧与排放控制技术、整机开发与可靠性技术及新能源汽车技术,E-mail:baishuzhan@sdu.edu.cn。

该模型分析了质子膜的液态水分布特性。

燃料电池发动机系统不仅包含燃料电池堆本身,还包括其他辅助系统,如燃料电池中的氢气供给系统、空气供给系统、水热管理系统、控制系统等。氢气供给系统的主要作用是保证燃料电池稳定可靠的氢源供应,从而确保其稳定运行,是燃料电池发动机系统的关键组成部分,因此对氢燃料电池氢气供给系统的研究具有较大的工程实用意义。保持燃料电池阳极的压力稳定对于提高电池的输出效率和延长质子交换膜的使用寿命至关重要。因此,确保恒定的电堆阳极压力对整个系统的性能和耐久性具有显著影响。He 等<sup>[9]</sup>开发了面向控制的燃料电池动态模型,基于该模型设计并优化了两种控制策略,均能维持稳定的阳极压力和氢气过量比。氢气供给系统的布置方式对氢气利用率和电池输出功率的影响很大。韩济泉等<sup>[10]</sup>为功率为 200 kW 的燃料电池设计了 4 种循环供氢系统,建立了循环供氢系统评价指标,采用理论分析和流体仿真计算相结合的方法对比 4 种供氢方案,结果表明:在大功率燃料电池电堆中,联合使用引射器和氢泵能够减小功率消耗。

燃料电池本身及其辅助都对燃料电池发动机系统的性能产生重要影响。如今仿真技术已经广泛应用于氢燃料电池的研发过程中,但是将燃料电池本身、供氢系统及其他辅助系统联合的仿真分析尚不多见。本文中综合考虑燃料电池本身、供氢系统、其他辅助系统中复杂的物理化学过程和运行特性,建立仿真模型,分析循环泵转速、排气时间以及排气周期对氢燃料电池各状态参数的影响,并进行试验验证,为优化氢燃料电池电堆的性能提供参考。

## 1 供氢系统设计与模型建立

### 1.1 供氢系统设计

燃料电池供氢系统有 3 种常用的布置方式:流通模式、闭端模式、循环模式,如图 1 所示。在流通模式中,氢气从储氢罐释放,依次通过减压阀和流量调节器,进入燃料电池电堆。其中一部分氢气在电池电堆中反应,未反应的氢气直接从燃料电池电堆出口释放。这种流动方式不利于保持电池堆内部压力的稳定,并且未参与反应的氢气直接排放不仅造成资源浪费,还可能带来安全风险。

在闭端模式中,氢气经储氢罐释放后,经过减压阀、比例阀,进入燃料电池电堆,但是由于燃料电池电堆的出口被封闭,氮气和水分在此处积聚,因此必须在电堆出口处设置排气阀以保证聚集气体排出。此外,为保证进入电堆时氢气的湿度在合理范围内,在燃料电池电堆之前还必须设置一个氢气增湿装置。

循环模式与其他模式不同的是:在燃料电池电堆后设置汽水分离器,用以干燥流过燃料电池电堆但未反应的氢气,干燥氢气经过循环装置后,又流至燃料电池电堆的入口处,实现氢气的再次利用。循环模式

不仅解决了氢气浪费问题,实现较大的氢气过量比,还能够充分利用电池内部生成的水实现自增湿。但是引入循环装置增加了系统的成本和系统控制的复杂度。

本文中对循环模式进行改进,氢气流动方向与循环模式相同,在原有基础上添加排气阀和控制器,排气阀定时开启以排出燃料电池堆中积累的氮气和水蒸气,控制器负责根据负载电流反馈调节比例阀开度、循环泵转速、排气阀排气时间和周期。改进后的燃料电池供氢系统设计方案如图 2 所示。

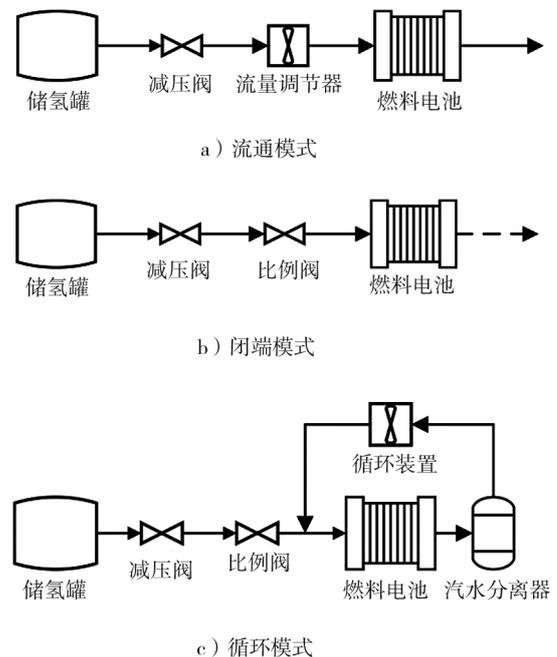


图 1 燃料电池供氢系统布置

## 1.2 电堆模型

本文中基于一台功率为 150 kW 的燃料电池电堆进行建模,将整个电堆内部视为一个各物理场均匀分布的整体。整个燃料电池电堆模型包括电压、阴阳极流动、氮气渗透、水跨膜运输和热传输计算。

单电池电压

$$U_{fc} = U - U_{act} - U_{ohm} - U_{conc},$$

式中:  $U$  为可逆电压, V, 表示反应完全可逆时,

理论上能达到的最大电压;  $U_{act}$  为活化损失电压, V, 由发生反应需要的活化能决定;  $U_{ohm}$  为欧姆损失电压, V, 与燃料电池内部导电材料的导电性能有关;  $U_{conc}$  为浓差损失, V, 由反应场所中反应物的浓度分布不均导致, 电流密度越高, 浓差损失越大。

整个电堆的电压

$$U_{st} = nU_{fc},$$

式中  $n$  为电堆堆叠的数量。

燃料电池中包含氢气、氧气、氮气和水的 4 种主要流体。阳极的氢气和阴极的氧气在膜电极处以反应的方式消耗, 在阴极生成气态水。液态水在电场电渗拖拽和浓度差渗透的双重作用下进行跨膜运输, 一定工况下阴、阳极中水达到平衡。阴极供入的气体为空气, 空气中氮气的体积分数高于 75%, 燃料电池运行时, 阴极的氮气在浓度差的作用下跨膜运输至阳极, 并在阳极循环累积。

燃料电池中各物质的传质过程使用质量守恒定律进行描述, 建立各组分的平衡方程:

$$\frac{dm(H_2)}{dt} = q_{m,in}(H_2) - q_{m,out}(H_2) - q_{m,react}(H_2),$$

$$\frac{dm(O_2)}{dt} = q_{m,in}(O_2) - q_{m,out}(O_2) - q_{m,react}(O_2),$$

$$\frac{dm(N_2)}{dt} = q_{m,in}(N_2) - q_{m,out}(N_2) \pm q_{m,osm}(N_2),$$

$$\frac{dm_w}{dt} = q_{m,v,in} - q_{m,v,out} \mp q_{m,v,mem}(q_{m,v,react}),$$

式中:  $m$  为物质的质量, kg;  $q_m$  为物质的质量流量, kg/s;  $H_2$ 、 $O_2$ 、 $N_2$ 、 $v$ 、 $w$  分别表示氢气、氧气、氮气、水蒸气和水, in、out 分别表示物质的流入和流出, react 表示参与反应, osm 表示跨膜运输, mem 表示质子交换膜;  $t$  为时间, s。

燃料电池运行时产生的大部分热量被冷却液带走, 小部分被阴、阳极气体带走, 极小一部分以辐射形式在环境中流失。按照热流量流入为正, 流出为负, 燃料电池电堆热量的平衡方程为:

$$c_{fc} \frac{dT_{fc}}{dt} = P_{chem} - P_{out} - P_{liquid} - P_{flow} - P_{rad},$$

式中:  $c_{fc}$  为电池比热容, J/(kg·K);  $T_{fc}$  为电堆温度, K;  $P_{chem}$  为化学反应热功率, W;  $P_{out}$  为电池输出功率, W;  $P_{liquid}$  为液态水吸收热量功率, W;  $P_{flow}$  为流体显热功率, W;  $P_{rad}$  为电池向环境辐射热功率, W。

## 1.3 辅助系统模型

氢燃料电池的辅助系统负责供应氢气、氧气以及冷却水, 涉及的部件相当多。为了简化计算过程并提高计算速度, 本文中对系统中的关键部件建模进行了简化处理。将储氢罐和减压阀视为一个整体, 内部为恒温恒压的氢气环境; 在燃料电池电堆中, 反应产生的水分通过汽水分离器被分离出来, 并通过专门的排水装置排出。由于排水装置长时间处于关闭状态, 其对系统的影响可以忽略不计, 因此可以假设循环流体中不存在液态水; 燃料电池系统内中冷器和散热器负责将相应的流体冷却至适宜温度, 假设两

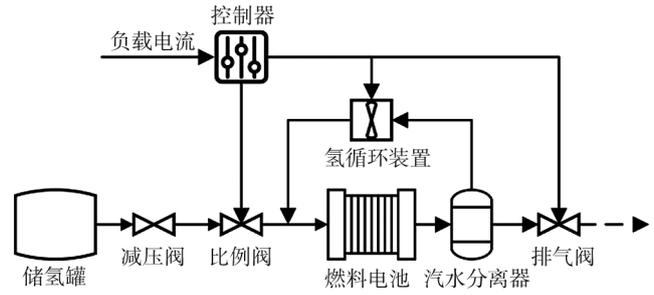


图2 燃料电池供氢系统设计方案

者均为正常工作,能够将流体冷却到目标温度;燃料电池中比例阀、空压机、增湿器等零件的建模过程,均认为是最佳工作状态下进行建模。

## 2 模型验证

### 2.1 试验平台

进行燃料电池发动机系统台架试验,验证模型的准确性,试验台架如图3所示,图中主要部件有空气滤清器和氢燃料电池发动机,黑色管道负责输送氢气和空气,白色管道用于冷却液的流动,橙色管道是用于信号传输的线路。

该测试系统涵盖了电堆单元、氢气供应单元、空气供应单元、水热管理单元、控制单元、电子负载以及辅助电源模块,该平台能够为电堆供应所需的氢气和空气,为辅助系统的组件提供必要的电力供应,发送启动和停止指令,设定功率信号,并实时监控电堆的电压和工作温度等关键参数。



图3 燃料电池发动机系统台架图

### 2.2 试验方案

燃料电池发动机系统启动后,电流在 80~580 A 内依次增加,其他条件不变,待系统达到稳态运行以后,记录不同电流下燃料电池平均单体电压、功率密度、氢气流量、冷却口入口温度、冷却口出口温度。

试验中主要的传感器有电压传感器、电流传感器、温度传感器、湿度传感器、氢气流量计、压力传感器,具体量程与精度如表1所示。

表1 传感器的量程与精度

传感器	电压传感器	电流传感器	温度传感器	湿度传感器	氢气流量计	压力传感器
量程	0~1 000 V	0~600 A	-20~100 ℃	0~100%	0~3 000 L/min	0~60 MPa
精度	满量程的±0.5%	满量程的±0.5%	±1 ℃	±3%	满量程的±0.2%	±1%

### 2.3 模型准确性

在相同工况下对模型进行计算,将计算出的极化曲线、氢气体积流量、冷却液入口温度、冷却液出口温度与试验结果进行对比,结果如图4所示,图4c)中  $U_t$ 、 $U_s$  分别为试验与仿真的平均单体电压。

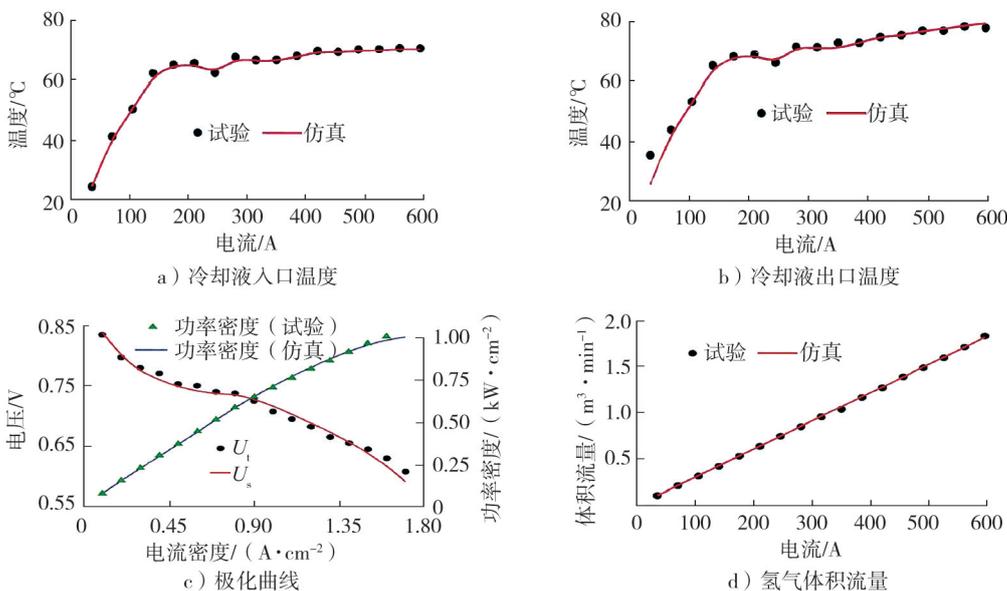


图4 电池极化曲线、氢气体积流量、冷却液入口温度、冷却液出口温度仿真与试验结果对比

由图4可知:功率密度、冷却液入口温度的仿真与试验结果吻合较好;在低电流密度下平均单体电压仿真结果略低于试验结果,在中电流密度下略高于试验结果,在高电流密度下又略低于试验结果;冷却液出口温度仅在低电流时出现了偏差,中高电流时的仿真结果与试验结果吻合较好。

总体来说,仿真计算和试验结果的趋势基本一致,低电流时的冷却出口温度的相对偏差较大,但由于氢燃料电池电堆一般工作在中高电流下,因此低电流时的偏差可以忽略,其余参数的相对偏差均在6%以内,表明模型具有较高准确性,能精确预测燃料电池系统不同工况下的工作状态。

### 3 供氢系统仿真分析

#### 3.1 影响因素分析

比例阀开度、循环泵转速、排气阀开启周期和时间(即排气周期与时间)是供氢系统控制的关键因素。比例阀开度随负载电流变化而变化,氢气流量随比例阀开度增大而增大。氢气压力和氢气过量比随循环泵转速的增加而增加,但循环泵功耗也随之增大,降低整个燃料电池系统的效率;循环泵转速降低,进入燃料电池堆的氢气压力和过量比减小,电池输出功率下降。排气周期和排气时间对系统中氮气的含量和气体压力有很大的影响,排气周期长、排气时间短,燃料电池中氮气难以及时排出,燃料电池输出功率下降;排气周期短、排气时间长又造成内部压力损失严重,氢气泄漏,浪费严重。因此,应寻找合适的策略对比例阀开度、循环泵转速、排气周期与时间进行控制,能兼顾氢气过量比、辅助系统功耗、氢气额外损失、内部压力,使燃料电池发动机在不同工况下均具有较高的输出功率。

#### 3.2 试验方案设计

为以较少的试验次数,全面分析循环泵转速、排气阀开启周期和时间对燃料电池各状态参数的影响,采用正交试验法构建三因素三水平的正交试验设计方案。循环泵转速选取2 500、3 000、3 500 r/min,排气阀开启时间选取0.5、1.0、1.5 s,开启周期选取8、10、20 s。正交试验设计方案如表2所示。

表2 正交试验设计方案

试验方案	循环泵转速/(r·min <sup>-1</sup> )	排气周期/s	排气时间/s	试验方案	循环泵转速/(r·min <sup>-1</sup> )	排气周期/s	排气时间/s
1	2 500	8	0.5	6	3 500	8	1.0
2	3 000	20	1.0	7	2 500	10	1.0
3	3 500	10	1.5	8	3 000	8	1.5
4	2 500	20	1.5	9	3 500	20	0.5
5	3 000	10	0.5				

#### 3.3 结果分析

仿真计算后发现,9组方案的变化趋势基本一致,以方案5为例,不同负载电流下氮气的体积分数变化如图5所示。由图5可知:排气阀开关前、后氮气体积分数、排气阀门开关对应的氮气体积分数差值均呈现相同的趋势;在低电流区间,三者随电流增大呈现快速上升的趋势;在中电流区间,氮气体积分数开始出现波动;在高电流区间,波动现象消失,氮气体积分数基本和电流成正比。

分别对电堆负载为20%、60%、100%3个工况的参数特性进行分析,3个工况对应的负载电流分别为105、350、595 A。3个工况下不同排气周期对应的氮气体积分

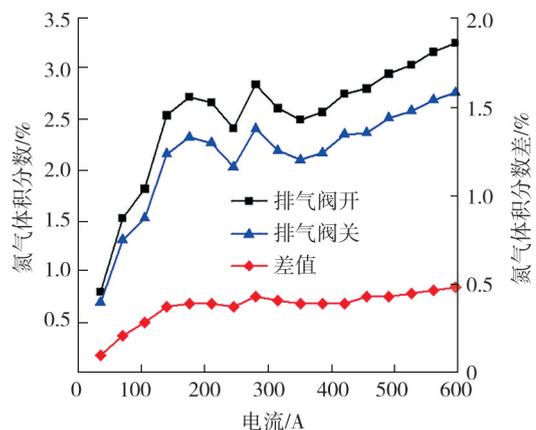


图5 方案5不同负载电流下的氮气体积分数

数如图6所示。由图6可知:排气周期为8s时,电池内部积累的氮气较少,氮气体积分数随排气时间增大而下降,排气时间对氮气体积分数变化影响微弱,考虑到排气时间越长,氢气泄漏也就越多,所以在排气周期为8s时,应尽可能减小排气时间以减少氢气泄漏;排气周期为10s时,氮气体积分数随排气时间先增大后减小,氮气体积分数变化最明显时排气效果最佳,因此对应排气时间为1s;排气周期为20s时,氮气体积分数随排气时间增大而增加,排气时间越短氮气体积分数变化越小。总的来看,排气周期小于10s时,适当减小排气时间更有利;排气周期大于10s时,应适当增大排气时间,有利于排出积累的氮气。

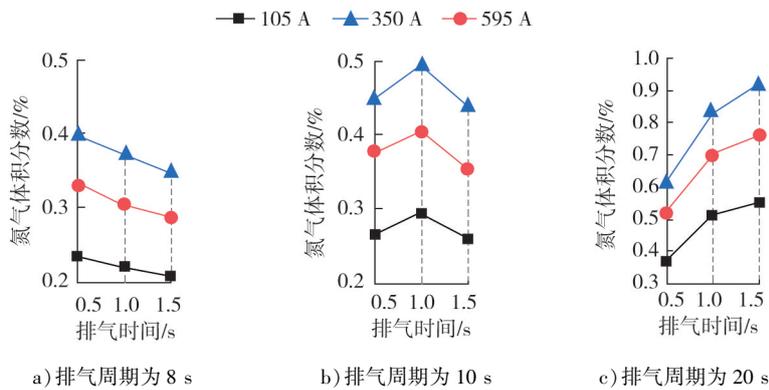


图6 不同排气周期对应的氮气体积分数

负载电流为105A时,不同试验方案氮气体积分数随时间变化趋势如图7所示。

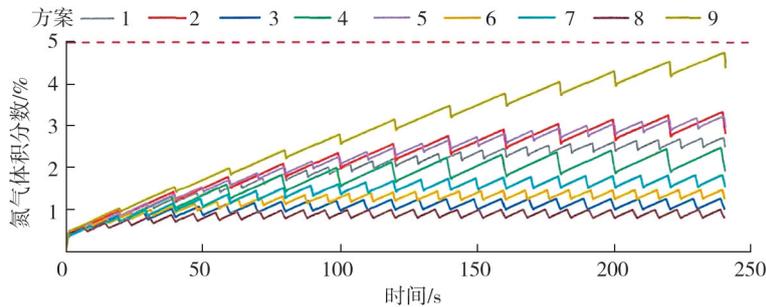


图7 负载电流为105A时氮气体积分数随时间变化

由图7可知:正交试验设计方案中,从1、4、7组,2、5、8组,3、6、9组进行分析,在循环泵转速相同时,氮气体积分数变化较大,说明排气周期和排气时间对阳极氮气体积分数影响较大,循环泵转速对氮气体积分数无影响;从1、6、8组,2、4、9组和3、5、7组来看,进入燃料电池电堆后的气体经排气后,在相同排气周期下,气体中的氮气体积分数随着排气时间的增加而降低;从1、5、9组,2、6、7组,3、4、8组进行分析,在相同排气时间下,经排气后的气体中氮气体积分数随排气周期的减小而降低。

阳极氢气体积流量与负载电流的关系如图8所示,氢气过量比和负载电流之间的关系如图9所示。由图8可知:排气阀门开、关时,氢气体积流量均随负载电流增大而线性增大。排气阀开启前,氮气在电池中积累,排气阀开启后,氮气排出,储氢罐和循环系统的氢气共同流入阳极,氢气流量增大。由图9可知:排气阀门关闭且低负载电流下,氢气反应速度较慢,阳极压力依靠氢气维持,此时氢气过量比较高;负载电流逐渐增大,反应消耗的氢气增多,氢气过量比迅速降低;当负载电流增大到200A,氢气过量比减小速度趋于平缓;排气阀门打开,尾气排出,氮气体积分数下降,为了维持阳极压力,进气流量增加,氢气过量比也有所增大。

3种工况下电堆输出电压和阳极压力随时间的变化如图10所示。由图10可知:模型运行50s后,不同电流负载下的电堆输出电压和阳极压力不再波动,趋于定值,此时可以认为模型达到了稳态状态。这表明在排气周期小于20s、排气时间小于1.5s时,电堆的电压和阳极压力将在一定时间后维持在一个

稳态值附近。

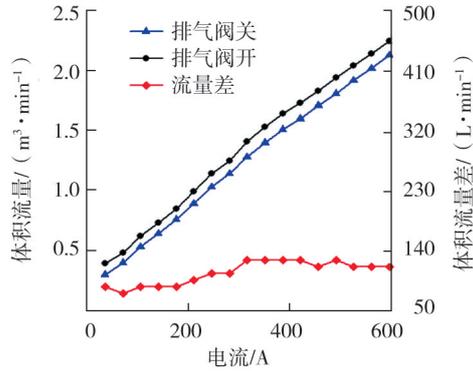


图8 不同负载电流下氢气的流量体积流量差

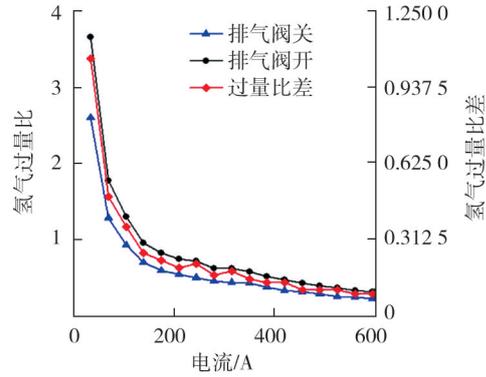


图9 不同负载电流下的氢气过量比和氢气过量比差

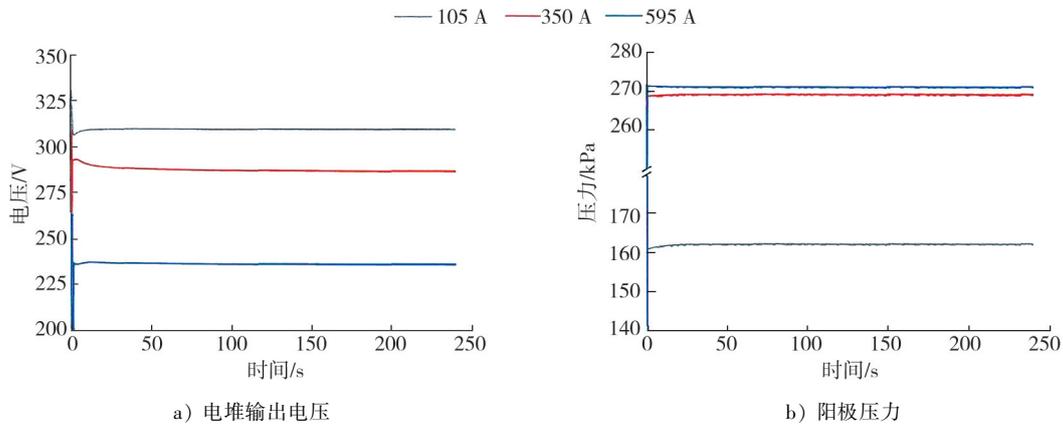


图10 不同工况下电堆输出电压和阳极压力

## 4 结论

基于改进后的循环式供氢系统,分析了供氢系统循环泵转速、排气周期、排气时间、负载电流等参数对电堆特性的影响,得到以下结论。

1) 在低负载电流下,阳极氮气体积分数较小,随负载电流增加,阳极氮气体积分数增大;在中电流区间,氮气体积分数开始出现波动;在高电流区间,波动现象消失,氮气体积分数基本和电流呈正比。

2) 当排气周期小于 10 s 时,排气时间应适当减小,减少氢气浪费;当排气周期大于 20 s 时,排气时间应适当增大,保证阳极累积氮气及时排出。

3) 阳极氢气的流量随负载电流增大而增大,两者呈线性关系;氢气过量比随负载电流增大而减小,低电流负载下,氢气过量比迅速减小;在中高电流负载下,氢气过量比减小速率趋于平缓。

### 参考文献:

- [1] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于印发能源发展战略行动计划(2014—2020年)的通知;能源发展战略行动计划(2014—2020年)[R/OL]. (2014-11-19)[2024-03-07]. [https://www.gov.cn/zhengce/content/2014-11/19/content\\_9222.html](https://www.gov.cn/zhengce/content/2014-11/19/content_9222.html).
- [2] 央视网. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话[Z/OL]. (2020-09-22)[2024-01-12]. <https://news.cctv.com/2020/09/22/ARTIe1sFSMNUlc0rG2rL342Q200922.shtml>.
- [3] 戴刘亮. 燃料电池水热管理的三维仿真及优化[D]. 济南:山东大学,2021.
- [4] 代春艳,雷亦婷. 氢燃料电池汽车技术、经济、环境研究现状及展望[J]. 中国能源,2020,42(6):25-31.

- [5] SPRINGER T E, ZAWODZINSKI T A, GOTTESFELD S. Polymer electrolyte fuel cell model [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1991, 138(8): 2334.
- [6] SINGH D, LU D M, DJILALI N. A two-dimensional analysis of mass transport in proton exchange membrane fuel cells [J]. International Journal of Engineering Science, 1999, 37(4): 431-452.
- [7] LIU H, ZHANG G, YU Z, et al. Research on liquid water distribution in PEMFC cathode porous media [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2020, 15(7): 6717-6736.
- [8] LIU H, ZHANG G, LI D, et al. Three-dimensional multi-phase simulation of cooling patterns for proton exchange membrane fuel cell based on a modified Bruggeman equation [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 174: 115313.
- [9] HE J, AHN J, CHOE S Y. Analysis and control of a fuel delivery system considering a two-phase anode model of the polymer electrolyte membrane fuel cell stack [J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(10): 4655-4670.
- [10] 韩济泉,孔祥程,冯健美,等. 大功率燃料电池汽车氢循环系统性能分析[J]. 汽车工程, 2022, 44(1): 1-7.

## Design and analysis of hydrogen supply system for a fuel cell engine

LIU Liming<sup>1</sup>, REN Chongchong<sup>2</sup>, LIU Min<sup>2</sup>, WANG Guihua<sup>1</sup>,  
BAI Shuzhan<sup>1\*</sup>, LI Guoxiang<sup>1</sup>

1. School of Nuclear Science, Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China

**Abstract:** Analyze the characteristics of three hydrogen supply system layouts: circulation, closed-loop, and circulation. Based on a hydrogen fuel cell stack with a power of 150 kW, the layout scheme of the circulation hydrogen supply system is improved, a simulation model of the fuel cell engine system is built, and orthogonal experimental design method is used to simulate and analyze nine different battery working states. The effects of the rotational speed of the circulation pump, exhaust cycle, and exhaust time on the performance of the fuel cell system are investigated. The simulation results show that the volume fraction of nitrogen at the anode of the fuel cell increases with the increase of current; the rotational speed of the circulating pump has no effect on the volume fraction of nitrogen gas in the anode of the fuel cell stack; when the exhaust cycle is less than 10 s, the exhaust duration should be appropriately reduced; when the exhaust cycle is greater than 20 s, the exhaust duration should be appropriately increased; the volume flow rate of anode hydrogen increases with the increase of current, while the excess ratio of hydrogen decreases with the increase of current.

**Keywords:** hydrogen fuel cell; hydrogen recirculation system; anode; simulation

(责任编辑:臧发业)