·燃料电池关键材料与系统性能优化技术专题·

燃料电池汽车吹扫技术研究

解官宝

（未势能源科技有限公司，常熟 215500）

【欢迎引用】解官宝. 燃料电池汽车吹扫技术研究[J]. 汽车文摘，2026(6): 23-34.

【Cite this paper】XIE G B. Research on Purge Technology for Fuel Cell Vehicles[J]. Automotive Digest (Chinese), 2026(6): 23-34.

【摘要】燃料电池车辆的吹扫是燃料电池发动机的关键后处理工艺，吹扫效率也直接影响燃料电池发动机的冷启动能力与系统寿命。为了揭示吹扫过程的内在机理、功能定义及工程实现手段，采用文献计量与专利分析相结合的研究方法，对燃料电池车辆吹扫技术进行系统性分析。结果表明，该技术主要呈现以下特征：(1)需针对差异化运行工况构建适配的吹扫架构与策略；(2)同一工况下的吹扫技术方案需在性能指标与经济成本之间寻求最优平衡；(3)特定工况下的最优吹扫工程实现并非单一的排水过程，而是在统筹吹扫介质、对象、参数及终止条件的基础上，综合考量整车能效、性能恢复、使用寿命及安全性等多重约束后的系统性决策。

关键词：燃料电池；燃料电池汽车；吹扫技术

中图分类号：TM911.42；U473.4　　文献标志码：A　　DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20250086

Research on Purge Technology for Fuel Cell Vehicles

Xie Guanbao

（FTXT Energy Technology Co., Ltd., Changshu 215500）

【Abstract】Purge operation in fuel cell vehicles constitutes a critical post-operation process for fuel cell engines, and its efficiency directly determines the engine's cold-start capability and overall system service life. To elucidate the underlying mechanisms, functional definitions, and engineering implementation approaches of the purge process, this paper employs a combined method of bibliometric analysis and patent analysis to systematically investigate purge technologies for fuel cell vehicles. The results indicate that such technologies are characterized by the following features: (1) Purge architectures and strategies must be tailored to different operating conditions; (2) For a given operating scenario, optimal trade-offs between technical performance and economic cost should be pursued; (3) The optimal engineering realization of purging under specific conditions is not merely a water removal procedure, but rather a systematic decision-making process that integrates considerations of purge medium, target objects, operational parameters, and termination criteria, while simultaneously accounting for multiple constraints such as vehicle energy efficiency, performance recovery, service life, and safety.

Key words: Fuel cells, Fuel cell vehicles, Purge technology

0 引言

燃料电池车辆作为氢能交通体系的核心载体，其商业化推广在很大程度上受制于系统的低温适应性、运行稳定性及长期耐久性。其中，停机吹扫技术作为燃料电池发动机的关键后处理工艺，旨在通过强制排除电堆内部残留液态水与气态杂质，防止停机后低温环境下因结冰造成的膜电极（Membrane Electrode Assembly，MEA）机械损伤与流场板变形，同时抑制催化剂层的化学降解并维持水热平衡。鉴于吹扫效率直接影响冷启动能力与系统寿命，该技术已成为制约燃料电池发动机性能突破的瓶颈之一。

为系统揭示吹扫过程的内在机理、功能定义及工程实现手段，本文采用文献综述与专利分析相结合的研究方法。首先，对关于吹扫微观机理与多物理场耦合建模的学术成果进行综述；其次，依托IPC分类号

(H01M8)在专利数据库中进行系统检索,筛选出668件相关专利文献,并进行系统性分析,旨在克服单一文献视角的局限性,深入分析燃料电池车辆吹扫技术的研究进展,为后续理论研究及工程应用提供参考。

1 燃料电池吹扫技术概述

1.1 吹扫的定义与构成要素

吹扫是指在燃料电池系统运行的不同阶段,通过引入选定吹扫气体并按照预设的吹扫参数流经吹扫对象,直至满足吹扫结束条件的过程。吹扫对象主要包括:电堆内部流道(阳极流道、阴极流道);电堆外部管路(进气、排气及旁路管道);电堆壳体及附属腔体(包括增湿器、氢气循环泵、阀门等辅助部件所在空间)。吹扫气体通常选用空气、氢气或惰性气体(如氮气),具体选择取决于吹扫目的与安全性要求。

1.2 吹扫参数的类型与影响因素

(1)吹扫流量/流速:可采用恒定流量或变流量控制。提高流量/流速可显著缩短吹扫时间并提升除水效率,但会增加能源消耗。参数设定需综合考虑环境温度与湿度(实时值与预测值)、车辆停放坡度、吹扫噪声及能耗、氢耗限制等因素[1-2]。

(2)吹扫时长:可为固定时长或在一定时间区间内动态调整。设定时需考虑环境温度和湿度、燃料电池系统运行时长、能耗/氢耗、噪声及停放坡度等因素。

(3)吹扫气体压力:过高或过低的气压差都不利于燃料电池内部的液态水排出[3],但可通过压差法促进残留水排出[4]。同时,需确保阴阳极压差在安全设计范围内,以避免膜电极损伤。

(4)吹扫气体温度:低温气体通过冷却效应带走更多热量与水汽;高温气体则可提高电堆温度,增大饱和蒸汽压,促进液态水蒸发。温度设定需结合环境温度和湿度及吹扫均匀性要求[5-6]。

(5)吹扫湿度/相对湿度(RH):较低的RH有利于移除燃料电池的液态水和水蒸气,而较高的RH可能导致吹扫结束时水在燃料电池内部的重新分布,甚至可能产生液态水[7]。

(6)吹扫次数:可根据停车时长、环境温度与湿度(当时的外部环境温度和湿度,预测的外部环境温度和湿度)、吹扫噪声等影响因素而设定。

1.3 吹扫结束条件

吹扫终止判据通常基于与电堆内部含水量呈强相关性的可测物理量,包括:

(1)电堆入口/出口水温,低于预设的停机水温阈值则结束。

(2)燃料电池系统的输出电压/单片电池电压(含各自的数学运算),低于预设的停机电压则结束。

(3)燃料电池系统的输出电流,达到临界电流阈值则结束。

(4)吹扫时间,达到预设(含标定)的吹扫时间则结束。

(5)燃料电池的阻抗,达到或高于预设的阻抗则结束。

上述条件的本质均为电堆内部含水量降至安全阈值以下,由于直接测量含水量困难,一般采用可测物理量进行间接判定[8]。

1.4 吹扫的必要性与应用场景

1.4.1 停机吹扫

燃料电池汽车在停机时,受增湿器持续增湿和停机前运行状态的影响,电堆内部流道及外部管路中会残留大量的液态水与气态水。这些液态水及气态水会在燃料电池系统下次启动时堵塞电堆内部流道或电堆外部管道,导致燃料电池系统启动失败,甚至会在低温环境下结冰给电堆膜电极造成不可逆的损伤[9]。

与此同时,阳极尾排气体中仍存在部分未参与反应的氢气,这些氢气经燃料电池系统的尾排通道排入大气,若氢气浓度达到氢气爆炸极限4.0%~75.6%(体积分数)时,遇到明火可能会爆炸。此外,在电堆密封性能下降等情况下,运转期间的氢气从电堆内部泄漏到电堆与电堆壳体之间的空间,燃料电池系统停机后,该空间内的氢气可能随时间而累积,不仅会在下次开机时触发氢气浓度报警并阻碍系统启动,更存在达到爆炸极限后在密闭环境中引发燃爆事故的严重安全隐患[10]。因此,除对电堆内部及管路进行除水吹扫外,还需针对电堆壳体空间实施专门的停机吹扫(以下简称“电堆壳体吹扫”),其主要目的是排除泄漏氢气,降低安全风险。

1.4.2 驻车吹扫(停机后定时唤醒吹扫)

燃料电池汽车在完成关机吹扫后,仍面临低温环境带来的潜在风险。在中国北方等地区,夜间气温通常降低至零度以下,或因寒流突袭导致环境温度骤降。若此前仅执行常温吹扫,且车辆从中午停放至次日清晨,电堆内部残留水分可能因低温冻结,导致组件受损[11]。同时,若关机时电堆温度显著高于外部环境温度,即便完成吹扫,随着电堆逐渐冷却,内部仍可能形成冷凝水。这不仅会影响下次启

动，且在低温下结冰将对膜电极造成不可逆损伤，缩短电堆使用寿命[12]。

与此同时，若停机后因阳极或电堆密封失效导致氢气泄漏，泄漏氢气可能在密闭空间内积聚，浓度逐步升高。当氢气浓度达到爆炸极限时，遇明火存在燃爆危险；若高浓度氢气进一步扩散至电堆壳体所在的密闭环境，将加剧安全风险。

为应对上述问题，可在关机吹扫完成后，基于电堆热模型预测冷凝水形成的时间窗口，并在达到预设唤醒时长后，结合当前环境温度判断是否可能结冰。如判定存在结冰风险，则由整车控制系统启动唤醒吹扫，对电堆内部残留水及泄漏氢气进行二次清除。该方法可有效防止低温结冰损伤，提升燃料电池低温适应性，并降低氢气聚集隐患[13]。在驻车期间定时触发的吹扫被称为“驻车吹扫/停机后定时唤醒整车吹扫”，其核心目的是除水与除氢。

1.4.3　运行中吹扫

除上述驻车阶段的吹扫外，燃料电池汽车在其他运行阶段亦需执行相应吹扫操作：

（1）开机吹扫：在系统启动前，因电堆内部可能存在杂质气体（如氢–空界面）或结冰现象，需通过吹扫清除残留水（冰）及氢气，以保障启动安全与性能稳定[14]。

（2）运行过程中吹扫：在长期运行中，阳极侧氮气逐渐累积，导致氢气分压下降，电池性能衰减。周期性开启排气阀，以氢气吹扫排出阳极累积氮气，能够恢复电堆性能。

（3）应急吹扫：在紧急停机或突发断电等异常情况下，空压机等关键部件无法正常运转，常规停机吹扫无法实施。此时，启动应急吹扫程序可减少残留水及氢气对系统的损害，避免寿命缩短。

1.4.4　总结

下文将依据其重要程度，以停机吹扫、驻车吹扫/停机后定时唤醒整车吹扫、开机吹扫、运行过程中吹扫和应急吹扫的顺序依次说明，其中停机吹扫是燃料电池汽车吹扫中最为关键的吹扫[15-16]。各类吹扫既可独立实施，也可在系统兼容且不冲突的前提下组合应用，例如同一辆车既执行停机吹扫，又在次日启动前执行开机吹扫，以形成完整的安全与性能保障体系。

1.5　吹扫的实现方法与策略

在以整车控制器（Vehicle Control Unit, VCU）为核心的燃料电池控制系统，通过吹扫系统及其关键零部件执行预设的吹扫步骤与控制策略，以达到预期的除水、除氢及其他特定目的。吹扫系统关键零部件优化方向分析如下：

（1）空滤器结构改进：优化气流分布与过滤效率，提升吹扫均匀性。

（2）阳极吹扫管与排出管设计优化：改善气体流通路径，减少压损，提高吹扫效率。

（3）吹扫阀结构改进：增强响应速度与密封性能，适应不同吹扫工况。

（4）单向阀设置：在吹扫排气管路中加装单向阀，防止氢气回流至电堆壳体或密闭空间，降低安全风险。

吹扫控制方法及适用场景如表1所示。吹扫策略典型案例分析如下：

（1）基于神经网络的吹扫能耗优化仿真：通过训练模型识别能耗最低的吹扫过程。

（2）电堆内部水含量预估与在线吹扫策略制定：实时估算含水量，动态调整吹扫参数。

（3）吹扫孔间距与孔径优化：提升电堆外壳内部吹扫均匀性。

表1　燃料电池汽车吹扫控制方法原理及适用场景

控制方法	原理与特点	适用场景
传统 PID	基于比例（P）、积分（I）、微分（D）线性组合控制偏差，适用于可建立精确数学模型的确定性系统	稳定工况、线性系统
模糊 PID	在传统PID基础上引入模糊控制，适应非线性与不确定性较强的工况	参数变化明显、模型不精确系统
神经 PID	由比例、积分、微分3个神经元组成，通过权重自适应调整，提高鲁棒性	复杂工业环境、多变量系统
前馈控制	在扰动发生前根据预测进行补偿，避免被控变量偏离	扰动可测、响应要求快的场合
模糊控制	将输入变量模糊化，通过规则库与推理机制输出控制信号	模型复杂、非线性、强不确定性系统
滑模控制	设计切换超平面，使系统状态沿该平面滑动至平衡点，抗干扰能力强	非线性、存在未建模动态的系统
模型预测控制	在每个采样时刻求解有限时域开环最优控制问题，仅实施首个控制动作，滚动优化	多变量、有约束、大延迟系统

(4)多策略改进麻雀算法的停机吹扫优化:根据停机时水含量制定差异化策略。

(5)面向多目标的阳极吹扫控制优化:兼顾除水、除氢与能耗。

(6)基于支持向量机的停机吹扫方式识别:在小样本条件下实现高精度判定。

(7)流场模型氢气浓度优化控制:以流场模型内部泄漏氢气的最大氢气浓度作为优化目标,避免出气口排出气体中的氢气浓度符合设定值而燃料电池空腔流场内泄漏氢气富集区域的氢气浓度超出设定值的情况,从而实现燃料电池实际最大氢气泄漏浓度值的准确监测。

吹扫目标具体包括:

(1)在保证除水、除氢的同时,降低吹扫能耗。

(2)在保证除水、除氢的同时,提高吹扫一致性或均匀性。

(3)在保证除水、除氢的同时,保证吹扫彻底无盲区。

(4)在保证除水、除氢的同时,确保吹扫过程中供电稳定性等。

2 燃料电池吹扫关键技术案例分析

2.1 停机吹扫

吹扫目的可为除水、除氢或两者兼有,具体取决于实际需求。为便于阐述,下文分别讨论以除水为主和以除氢为主的停机吹扫。

2.1.1 以除水为主要目的的停机吹扫

2.1.1.1 停机吹扫激活条件

根据燃料电池系统接收停机指令时的负载状态,可分为:

(1)空载吹扫:切断负载后立即执行吹扫(图1)。

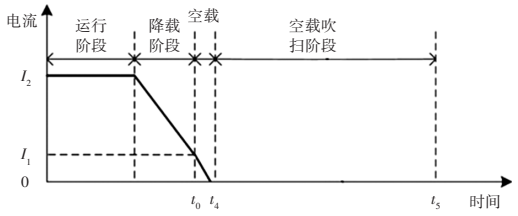


图1 空载吹扫[17]

(2)带载吹扫:在降至特定输出电流并维持该电流的条件下进行吹扫(图2)。

(3)带载+空载吹扫:分阶段执行带载与空载吹扫,兼顾除水效果与系统安全。燃料电池系统接收到停机指令后,在激活停机吹扫时,根据此时是否带载,可以将激活停机吹扫的条件分为空载、带载、带载+空载(图3)[17]。

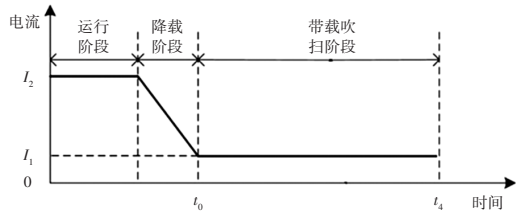


图2 带载吹扫[17]

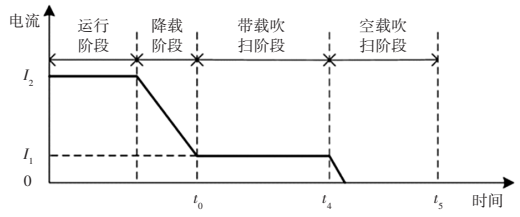


图3 带载+空载吹扫[17]

2.1.1.2 阴极空气/氮气吹扫

阴极空气吹扫(带空气循环泵)如图4所示[18]。阴极回路20关闭且吹扫回路20开启,空气压缩机21停止运行,燃料电池堆22的阴极反应气体流出至吹扫回路10的气液分离器11和空气循环泵12,气液分离器11将气体和水分离,分离后的水直接排出,分离后的气体重新输入至阴极对其上的水进行吹扫,之后反应气体连同水再次输入至吹扫回路10,以此循环以对阴极上的水进行吹扫。通过在燃料电池堆22的阴极入口和阴极出口并联吹扫回路10,能够循环利用阴极的反应气体对阴极的水进行吹扫。

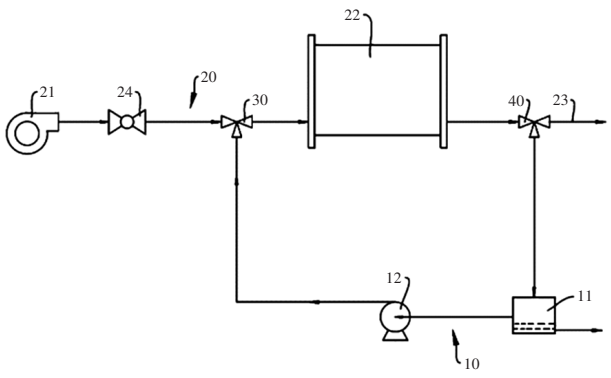


图4 阴极空气吹扫(带空气循环泵)[18]

阴极空气吹扫(不带空气循环泵)如图5所示[19]。空气压缩机经由中冷器、第一电磁阀向燃料电池的阴极入口通入干燥的压缩空气,通过通入燃料电池阴极入口的压缩空气对燃料电池的阴极进行吹扫。

阴极氮气吹扫如图6所示[20]。关闭空气子系统进入燃料电池电堆1的电磁阀一241,打开储氮罐32进入燃料电池电堆1的出气电磁阀322,关闭电磁阀二221,同时打开电磁阀三251,空压机21工作,利用储氮罐32中的氮气对电堆阴极进行吹扫,此时进气电磁

阀321处于关闭状态，尾排阀42处于打开状态，待燃料电池电堆阴极中的空气被氮气吹扫完成后，关闭空压机21，同时关闭电磁阀二221、电磁阀三251、尾排阀42及进气电磁阀321。

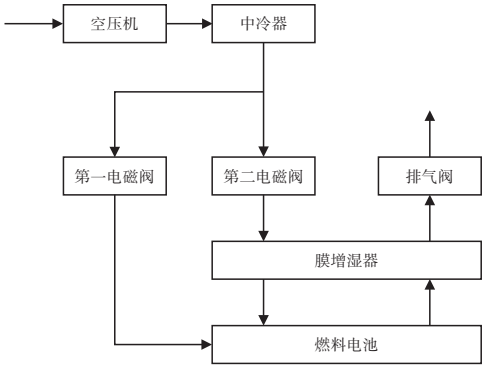


图5　阴极空气吹扫(不带空气循环泵)[19]

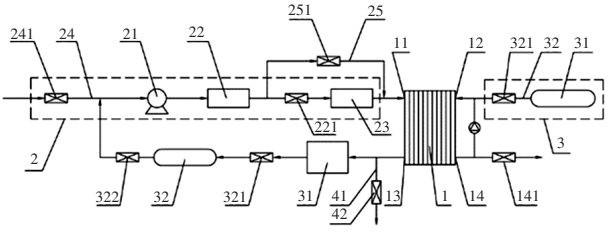


图6　阴极氮气吹扫[20]

2.1.1.3　阳极氢气/氮气吹扫

阳极氢气吹扫如图7所示[21]。当燃料电池汽车的钥匙开关切换为断电挡时，供氢系统为燃料电池发动机持续供应氢气，以利用氢气流动对电堆进行吹扫。在此过程中，系统实时监控供氢的持续时长；若持续时长达到预设的目标时长，则控制供氢系统停止供氢，并使其进入休眠状态。若持续时长尚未达到目标时长，但燃料电池发动机已发送吹扫完成信号，则系统响应该信号，立即停止供氢并使供氢系统进入休眠状态。此外，当整车钥匙开关处于通电挡时，供氢系统向燃料电池发动机供应氢气，为车辆行驶提供动力。

阳极氮气吹扫如图8所示[22]。燃料电池200可为质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell，PEMFC)，其包含燃料电池堆210及与之相连(或断开)的其他组件200-n。燃料电池堆210具有阴极211和阳极212。其中，废气收集单元110被配置为能够在燃料电池200未处于停机状态的情况下，收集从燃料电池200的燃料电池堆210的阴极211排出的含氮废气。吹扫单元120被配置为能够在废气收集单元110内的气体压力大于预定压力阈值并且燃料电池200处于停机状态的情况下，使用废气收集单元110收集的含氮废气对燃料电池堆210的阳极212进行吹扫。

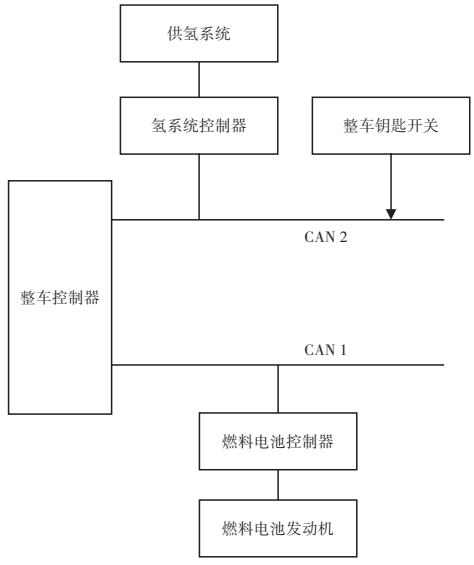


图7　阳极氢气吹扫[21]

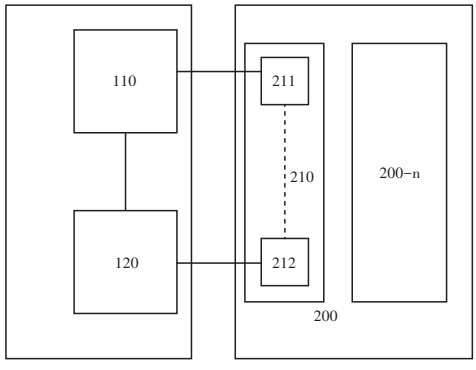


图8　阳极氮气吹扫[22]

阳极尾排回收氢气吹扫如图9所示[23]。燃料电池工作时，需要氢气尾排并且阳极进气压力超过195 kPa(绝对压力)时，不打开排氮阀7和吹扫阀12，打开回收阀10，氢气尾排回收瓶充气；燃料电池工作时，需要氢气尾排，当氢气尾排回收瓶气体压力达到170 kPa(绝对压力)时，关闭回收阀10，打开排氮阀7，通过排氮阀7进行尾排；燃料电池停机时，进行停机吹扫，关闭进氢阀1，打开回收阀10和吹扫阀12，通过气水分离器5排出燃料电池阳极液态水；进入停机吹扫末端时，关闭回收阀10，打开排氮阀7，排出剩余气态水；尾排结束后，氢泵4停机，关闭排氮阀7。

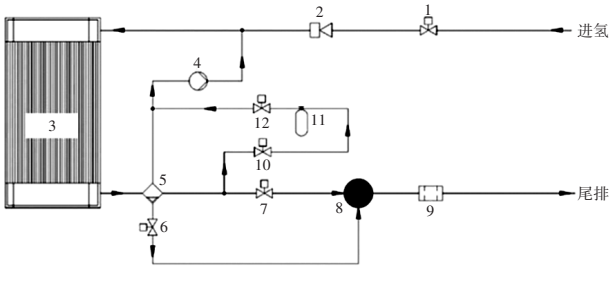


图9　阳极尾排回收氢气吹扫[23]

阳极氢气正向吹扫、反向吹扫如图10所示[24]。方向切换阀20使得供气管道10切换连通第一开口202、第二开口203，利用流通的气体对液态水进行吹扫，切换连通第一开口202、第二开口203实现正向吹扫、反向吹扫，使得液态水在燃料电池电堆200内部更加均匀，实现结构简单。

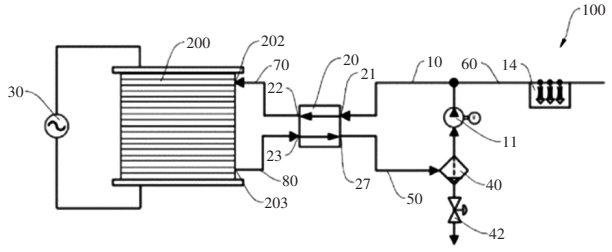


图10　阳极氢气正向吹扫、反向吹扫[24]

2.1.1.4　阴极空气/氮气吹扫+阳极氢气/氮气吹扫

阴极空气吹扫+阳极氢气吹扫如图11所示[25]。先通过控制第一三通阀、第二三通阀以及第三三通阀，使氢气管组和空气管组分别对燃料电池堆的第一电极和第二电极进行吹扫，然后通过再次控制第一三通阀、第二三通阀以及第三三通阀，使空气管组中的空气进气管路可以与氢气出气管路连通，且空气进气管路中空气可以对设置在氢气出气管路中的汽水分离器和氢气循环泵进行吹扫，而空气对氢气出气管路进行吹扫时，由于汽水分离器和氢气循环泵本身的特性，可以提高空气吹扫的强度，减少吹扫的时长，进而减小氢气出气管路进行吹扫时的耗能，提高吹扫的效率。

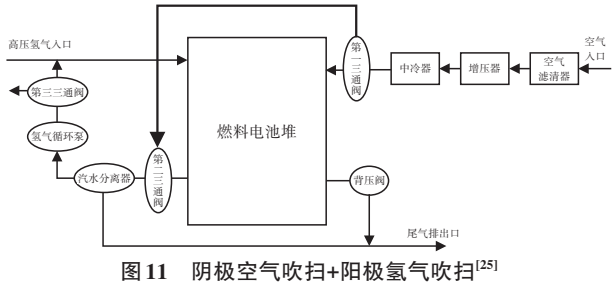


图11　阴极空气吹扫+阳极氢气吹扫[25]

阴极氮气吹扫+阳极氮气吹扫如图12所示[26]。文献[26]提出了一种燃料电池氮气吹扫系统，包括燃料电池本体10、氮气瓶20和三通阀30，氮气瓶20通过三通阀30分别与燃料电池本体10的阴极和阳极连通，其可向燃料电池本体10的阴极和阳极同时输送氮气。三通阀30的第一连接端通过管路与氮气瓶20的出气端连接，其第二连接端通过管路与燃料电池本体10的阴极连接，其第三连接端通过管路与燃料电池本体10的阳极连接，氮气瓶20在输送气体时，其通过管路和三通阀30子向燃料电池本体10的阴极和阳极同时输送氮气，以对燃料电池本体10内部残留的水进行吹扫。其中，在燃料电池本体10停机过程中，采用氮气这种惰性气体对于燃料电池的寿命的延长和运行性能的稳定有着较好的促进作用，同时对燃料电池本体10阴、阳极两侧均通入氮气进行相应的吹扫，既实现了保压状态也起到了排出燃料电池内部水分的目的。而三通阀30起到了分流的作用，让氮气流入燃料电池阴极、阳极两侧，避免了一侧压力过高对燃料电池内部结构产生损伤。

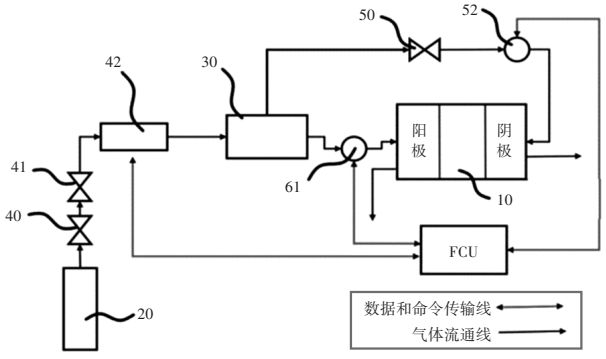


图12　阴极氮气吹扫+阳极氮气吹扫[26]

2.1.1.5　吹扫氢气循环泵

如图13所示[27]，通过设置控制装置、电磁阀3和循环泵7，使整个系统能够在正吹扫模式和反吹扫模式之间进行切换，当处于正吹扫模式时，电磁阀3打开，循环泵7正转，清扫气体从供氢装置1中经过电磁阀3到达电堆4，将电堆4中的液体吹扫出，并在气液分离器9中分离为液体和气体，液体通过排出管路排出，气体则在循环泵7的正转下输入到第一管路2，进行循环使用，当电堆4吹扫干净后，切换为反吹扫模式，电磁阀3关闭，循环泵7反转或停机，清扫气体从供氢装置1中输出到循环泵7中，对循环泵7进行吹扫，将循环泵7中的高温水汽吹扫至气液分离器9，并通过排出管路10排出，不仅解决循环泵7卡滞的问题，而且结构简单，便于使用。

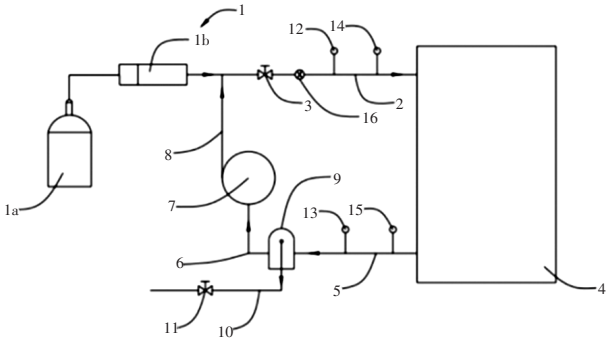


图13　吹扫氢气循环泵[27]

2.1.1.6　吹扫增湿器

如图14所示[28]，吹扫增湿器可根据环境温度与电堆发生结冰的结冰温度阈值的相对关系，分阶段调控电堆与增湿器的吹扫流程。具体而言，在$T>T_1$时，空气经过增湿器和电堆，对电堆和增湿器同时进行吹扫，至$X>X_1$；在$T\leqslant T_1$时，首先对电堆和增湿器进行吹扫，至$X>X_2$，然后对增湿器进行单独吹扫，至$\Delta y<\Delta y_1$。其中：T为环境温度，T_1为结冰温度；X为内阻监测装置监测的电堆的内阻，X_1为$T>T_1$时内阻监测装置的标定内阻，X_2为$T\leqslant T_1$时内阻监测装置的标定内阻；Δy为增湿器的第一入口的空气湿度与增湿器的第二出口的空气湿度的差值，Δy_1为增湿器的空气湿度的差值的标定值。文献[28]将电堆中水分的含量量化为电堆的内阻与标定的电堆的内阻的差值；同时，将增湿器中水分的含量量化为增湿器第一入口的空气湿度与增湿器的第二出口空气湿度的差值和该差值与增湿器空气湿度差值标定值之间的差值。保证电堆和增湿器中水分的含量，始终维持在不会发生结冰的安全范围内。

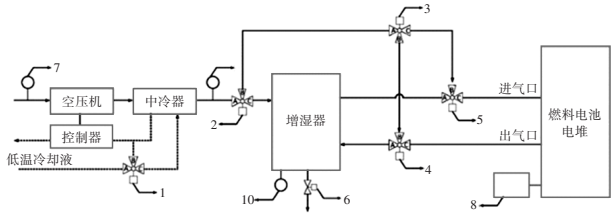


图14　吹扫增湿器[28]

如图15所示[29]，燃料电池停机后，首先检测增湿器5管路内是否存在液态水积聚。若确认有积水，则增加空压机3的输出风量，利用高速气流对增湿器5管路内的积水进行吹扫清除。

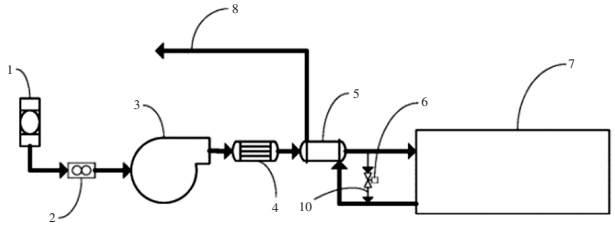


图15　吹扫增湿器[29]

2.1.1.7　吹扫排水阀/排气阀/排氮阀

吹扫排水阀/排气阀/排氮阀示意如图16所示[30]。当检测到燃料电池停机指令时，开启第一吹扫通路以执行燃料电池吹扫；当系统检测到吹扫完成指令后，关闭第一吹扫通路，并获取目标车辆的实测环境温度。若实测环境温度低于预设温度阈值，则开启第二吹扫通路，对目标阀体（包括排氢电磁阀与排水电磁阀）进行针对性吹扫，以防止低温下残留水分结冰或氢气积聚。

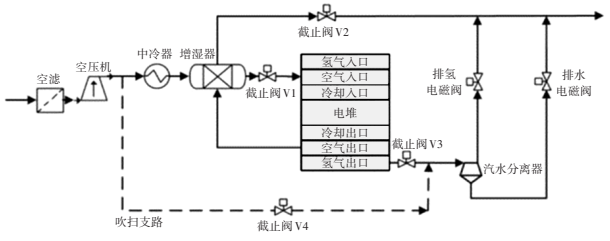


图16　吹扫排水阀/排气阀/排氮阀[30]

2.1.2　以除氢为主要目的的停机吹扫

以除氢为主要目的的停机吹扫，以电堆壳体（箱体）为吹扫对象，以空气/氮气为吹扫气体，辅以真空发生器抽气、换气机构换气、泄压机构泄气等技术手段。

2.1.2.1　入堆旁通空气通入电堆壳体吹扫

如图17所示[31]，通过氢气浓度传感器采集电堆箱体内部的实时氢气浓度。为提高检测精度，可在电堆箱体内部布设多个氢气浓度传感器，通过计算多点检测值的算术平均值，将其作为最终的实时氢气浓度。基于该实时浓度反馈，系统动态调节电子流量阀的开度，以控制流入电堆箱体的空气流量，从而将箱体内部的氢气浓度维持在预设安全范围内。其中，电子流量阀的入口与中冷器的第一出口相连，出口则与电堆箱体的吹扫入口连通。

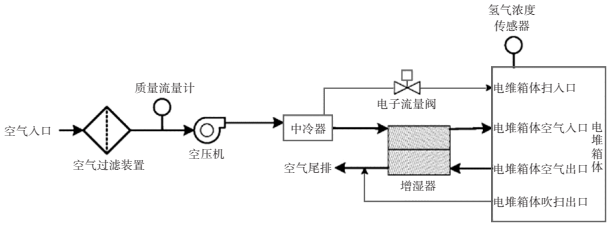


图17　入堆旁通空气通入电堆壳体吹扫[31]

2.1.2.2　出堆空气回收后（氮含量高的空气）通入电堆壳体吹扫

如图18所示[32]，通过框体取气回路30对框体10供气，以吹扫并排出积聚于框体10内部的逃逸氢气。框体取气回路30与电堆20的阴极侧对应的第二排气口连通，使吹扫气体来源于电堆阴极反应后的排气。由于该排气为已参与反应的空气，其氧气含量较低而氮气含量较高。

采用电堆阴极尾气作为吹扫气源具有双重优势：

（1）经济性提升：吹扫气体无需经过空压机70压缩，空压机输出的压缩空气可专用于电堆20供气，从而降低了空压机的无效功耗，提升了空气子系统的能量利用效率。

（2）安全性增强：利用阴极排气中高含量的氮气（惰性气体）进行吹扫，有效降低了框体10内的助燃氧

气浓度，从而减小了氢气燃爆的风险，提高了吹扫过程的安全性能。

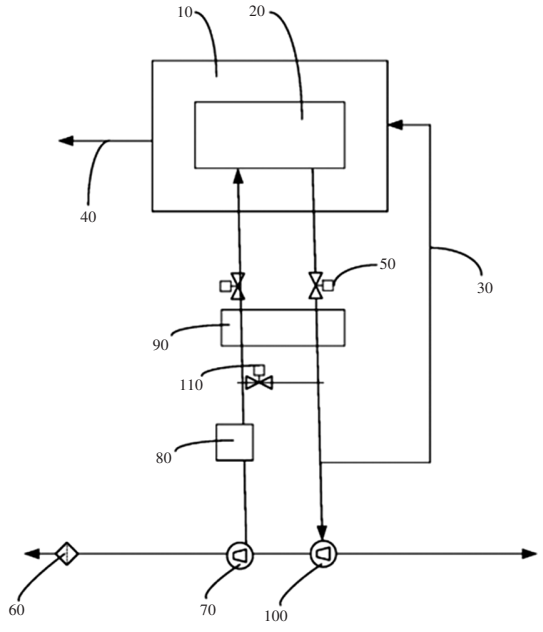


图18　出堆空气回收后（氮含量高的空气）通入电堆壳体吹扫[32]

2.2　驻车吹扫/停机后定时唤醒整车吹扫

为防止燃料电池在驻车或停机期间因内部温度与环境温度差异过大而导致冷凝水结冰损伤，或因氢气泄漏在密闭空间内积聚引发爆炸风险，需实施停机后定期唤醒吹扫，以实现除水与除氢的目的。

驻车吹扫的核心在于唤醒机制与唤醒后吹扫策略。唤醒方式可分为2类：

（1）定周期唤醒[33-34]：在关机后N分钟开始监测环境温度与电堆温度，根据降温速率推算堆温降至目标温度所需时间t_1，并于t_1时刻唤醒电堆[35]；或通过重复试验建立基于电堆冷却液出口温度与环境温度的唤醒时长映射表，并预存于燃料电池控制器中[12]。

（2）实时环境触发唤醒[34]：通过氢气/氧气浓度传感器实时监测环境气体浓度[36]，或通过温度传感器监测环境温度[35]，在满足条件时即时唤醒。

唤醒后的吹扫与停机吹扫类似，区别在于定周期地唤醒后可能根据检测结果判定无需吹扫，或依据环境状况动态调整唤醒周期长度。

如图19所示，文献[11]提出了一种典型的驻车吹扫方法，具体包括：判断与燃料电池控制单元（Fuel Cell Control Unit，FCU）相连的VCU是否已唤醒。若VCU已唤醒，则重新启动燃料电池，并以低温吹扫方式执行关机吹扫，完成后再次关机；若VCU未唤醒，则终止本次吹扫流程。

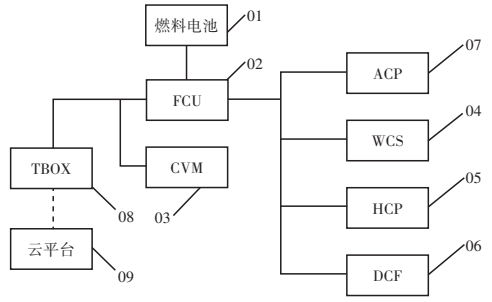


图19　驻车吹扫/停机后定时唤醒整车吹扫[11]

2.3　开机吹扫

燃料电池在开机阶段，其内部往往存在杂质气体并形成氢-空界面，同时可能伴有残留水或结冰现象，因此需要通过吹扫实现除氢、除水及除冰。

吹扫流量的设定取决于系统内部堵塞情况，该情况可通过燃料电池系统的内部电压（与阻抗存在对应关系，包括单体电池电压）进行评估。一般而言，内部电压符合开机设定要求时所需的吹扫流量较小，而内部电压未达到设定要求时则需增大吹扫流量，以确保吹扫效果。

2.3.1　利用空压机的入堆空气进行常温+低温吹扫

如图20所示，文献[37]提出了一种开机阳极吹扫方法，具体包括：燃料电池系统收到开机启动指令后，启动水泵7并检测电堆21冷却液出入口温度。若出入口温度均高于预设阈值a（一般范围为-2~5 ℃），系统进入常温启动流程，否则进入低温启动流程。

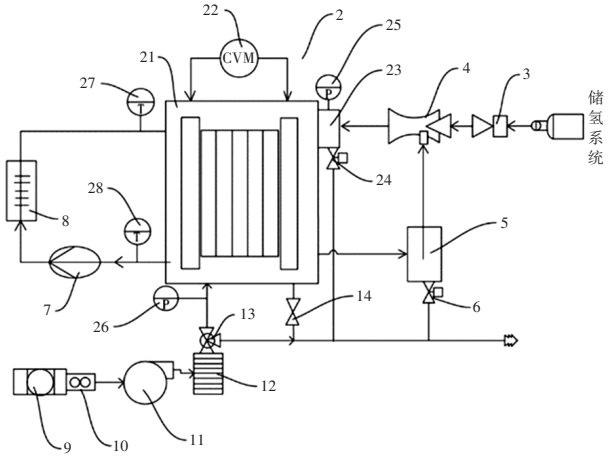


图20　利用空压机的入堆空气进行常温+低温吹扫[37]

常温启动流程中，空气压缩机11以起飞转速运行，进气三通阀13全关，空气吹扫阴极外围管路。检测阴极入口压力P_0，控制氢气比例阀3向阳极补充少量氢气，使阳极压力达到P_0+b（b值范围一般为0~7 kPa）。随后判断靠近氢气进气端的前N节单体电池的平均电压是否不低于阈值c mV。若若平均电压低于阈值c，

判定系统处于富氢环境，无需阳极吹扫，仅将阳极压力补至阈值d（一般范围为5~25 kPa·g）并开启排气阀6f次，以清除电堆21内可能存在的液态水，同时执行阴极吹扫即可；若平均电压高于阈值c，则判定系统处于富氧环境，需要进行阳极快速吹扫。

2.3.2　利用空压机出堆空气进行吹扫

如图21所示[38]，燃料电池系统处于加载前状态时，控制器控制第一吹扫管路401与吹扫入口导通，第二吹扫管路402与吹扫入口不导通。通过空压机1的出气口流出的空气经过第一吹扫管路401流入燃料电池堆2，对燃料电池堆2内的氢气进行吹扫。燃料电池系统处于加载状态时，控制器控制第二吹扫管路402与吹扫入口导通，第一吹扫管路401与吹扫入口不导通，从气水分离器3流出尾排空气经过第二吹扫管路402流入燃料电池堆2，对燃料电池堆2内的氢气进行吹扫。该方案在加载阶段利用尾排空气吹扫，无需空压机1额外做功，降低了系统功耗；在加载前无尾气产生时，直接利用空压机1出口空气吹扫，可将残留氢气排出，确保加载时氢气浓度处于安全范围。

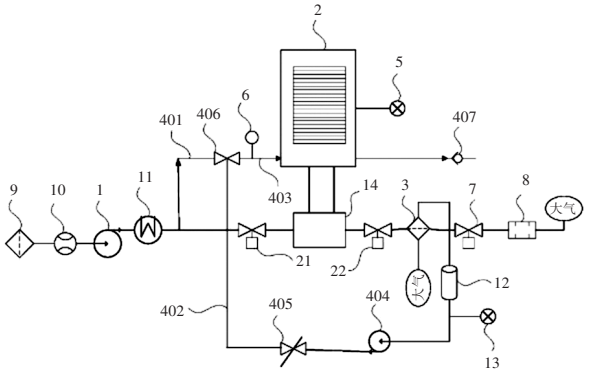


图21　利用空压机的出堆空气进行吹扫[38]

2.3.3　利用空压机通入空气中分离的氮气进行吹扫

如图22所示[39]，对阳极腔进行氮气吹扫时，空压机21向变压吸附装置通入空气，此时第一排气管路41的第一通断阀410与第二排气管路42的第二通断阀420均关闭。随着空气不断通入，变压吸附装置内压力升高至高压状态，分子筛吸附空气中的氮气分子，实现氧氮分离。当分子筛吸附饱和后，打开第一通断阀410排放氧气，待装置压力降至低压，分子筛解吸出氮气，此时关闭第一通断阀410，打开第二通断阀420，将纯化氮气经第二排气管路42通入阳极腔进行吹扫，将腔内空气由第一尾气排放管路51排出。

该氮气吹扫装置在系统启动前对阳极腔进行清洁，可有效延长燃料电池寿命，且无需额外氮气源，维护成本低。由于采用变压吸附装置，该方案特别适用于重型载货车等商用燃料电池汽车全生命周期的吹扫需求。

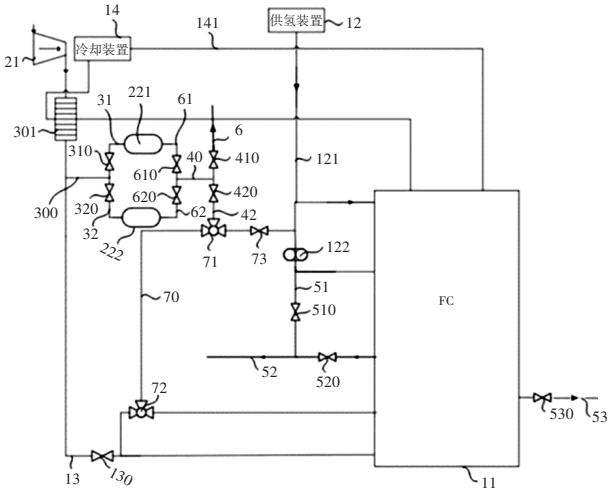


图22　利用从空压机通入的空气中分离的氮气进行吹扫[39]

2.3.4　利用氮气罐携带的氮气进行吹扫

如图23所示[40]，在燃料电池启动过程中，首先通过燃料电池散热系统的冷却水对燃料电池电堆进行加热。当冷却水温度达到设定值时，开启氮气吹扫系统，经氮气罐释放后，氮气流经第二电磁阀、第二减压阀、第二流量计、第一温压湿一体传感器、被吹扫的燃料电池电堆、第二温压湿一体传感器到达三通电磁阀17，三通电磁阀17与气液分离器18相连的出口关闭，通往储液箱的出口开启，氮气流经储液箱后排至外界环境，回收至储液箱的液态水定时排出系统。

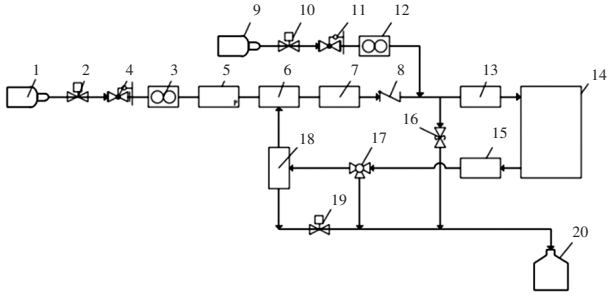


图23　利用氮气罐携带的氮气进行吹扫[40]

氮气吹扫系统结束后，三通阀与气液分离器连通的出口打开，通往储液箱的出口关闭，此时下一轮氢气循环系统开启，从燃料电池电堆排出的过量氢气流经气液分离器后送入氢气循环系统中再次利用。

2.3.5　利用低氧浓度气体存储罐进行吹扫

如图24所示，文献[41]提出的方案包括停机阶段与开机阶段的吹扫过程：(1)停机过程中或有制作低氧含量气体需要时，关停空压机2，关闭电磁阀b11，打开电磁阀c12、电磁阀d13和单向阀14，使用在燃料电池堆1阳极侧中残留或按需保留的氢气，持续发电，将

阴极侧空气中的氧气消耗掉，得到低氧浓度气体，该低氧浓度气体通过分支管路6存于低氧浓度气体储存罐7，以及通过循环管路8输送到燃料电池堆1的阳极侧，吹扫阳极侧流道中的剩余氢气，使氢气浓度降低至4%以下；(2)开机前，先打开电磁阀d13和单向阀14，将低氧浓度气体储存罐7储存的低氧浓度气体充填和吹扫燃料电池堆1阳极侧，排出其中可能存留的氧气或降低阳极侧的氧含量到安全充氢的程度然后打开电磁阀e15输入氢气。

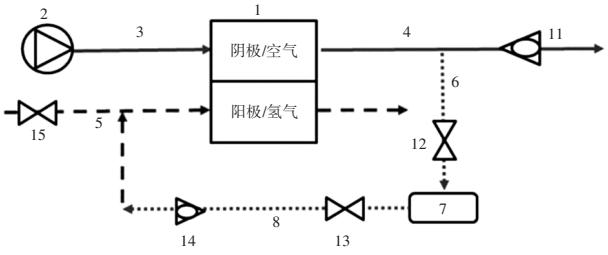


图24　利用低氧浓度气体存储罐进行吹扫[41]

2.4　运行过程中吹扫

燃料电池汽车在运行过程中，特别是采用氢气循环策略的质子交换膜燃料电池汽车，循环的氢气中携带的氮气会不断在阳极中积聚，再加上阴极侧空气中的氮气也会穿过质子交换膜渗透到阳极，导致阳极内氮气会逐渐累积，氮气的积累会导致阳极内氢气的浓度降低，从而使电池性能不断下降。因此，电池堆工作一定时间后，必须打开排气阀，用氢气吹扫出阳极内累积的氮气，使电池性能恢复。

文献[42]提出了一种燃料电池阳极吹扫的控制方法，包括如下步骤：

步骤1：计算燃料电池系统的阳极氮气的摩尔浓度，计算燃料电池系统各单片电池电压的均匀度。

步骤2：设定阳极氮气的摩尔浓度的上限值为β，各单片电池电压的均匀度的临界值为γ，判断步骤1中计算的阳极氮气的摩尔浓度是否大于上限值β，判断步骤1中计算的各单片电池电压的均匀度是否大于临界值γ。

步骤3：当阳极氮气的摩尔浓度大于上限值β，或各单片电池电压的均匀度大于临界值γ时，开启吹扫阀，通过阳极吹扫除去阳极积累的氮气；否则保持吹扫阀关闭状态，并返回步骤1。

步骤4：吹扫阀处于开启状态时，实时计算燃料电池系统的阳极氮气的摩尔浓度，计算燃料电池系统各单片电池电压的均匀度。

步骤5：设定阳极氮气的摩尔浓度的下限值为α，判断步骤4中计算的阳极氮气的摩尔浓度是否小于下限值α，判断步骤4中计算的各单片电池电压的均匀度是否小于等于临界值γ。

步骤6：当阳极氮气的摩尔浓度小于下限值α，且各单片电池电压的均匀度小于等于临界值γ时，关闭吹扫阀；否则保持吹扫阀开启状态，并返回步骤4。

2.5　应急吹扫

燃料电池在紧急停机时并不执行吹扫，车辆突然断电导致吹扫策略未执行，影响燃料电池的使用性能，并导致燃料电池的寿命缩短，用户体验较差。

2.5.1　增加空气储气室吹扫阴极

如图25所示[43]，燃料电池发动机的吹扫装置包括空压机1、中冷器2、第一三通阀3、第二三通阀4、储气室5、增湿器7。识别发动机出现紧急停机或突然断电，关闭燃料电池发动机并执行：控制第二三通阀4的端口二B、端口三C均打开以向电堆8执行紧急吹扫。

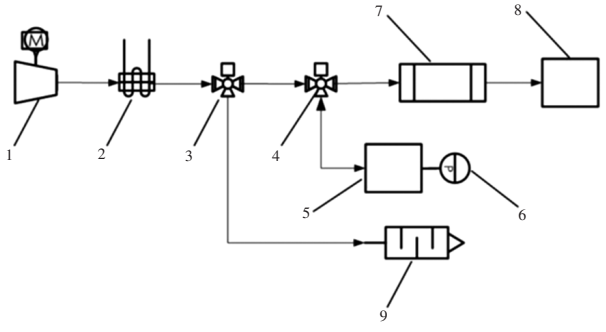


图25　增加空气储气室吹扫阴极[43]

2.5.2　利用氢气储气瓶吹扫阴极

如图26所示，文献[44]提出了一种燃料电池应急吹扫系统，该系统主要由以下部分组成：

(1)燃料瓶01：燃料瓶用于存储高压可燃气体，通常可选用氢气或其他可燃气体。其具体结构与规格可根据实际需求选择，只需确保其具备存储高压可燃气体的能力。例如，可采用氢气瓶，并在其中存储高压氢气。

(2)应急吹扫管路02：应急吹扫管路的一端连接燃料瓶的出气口，另一端连接燃料电池的空气入口。该管路可由单一管道构成，用于在空压机无法正常运行时，将燃料瓶中的高压可燃气体引入燃料电池，以替代常规的高压空气吹扫。

(3)比例阀03：比例阀安装在应急吹扫管路中，用于调节从燃料瓶流入燃料电池的气体流量。由于燃料电池停机前的运行工况不同，所需的吹扫气体量也会有所差异，因此设置比例阀可以避免过量可燃气体进入燃料电池，减少资源浪费。

该系统的工作原理为：当空压机无法正常工作且需要对燃料电池进行吹扫时，开启比例阀并调节其开度，以控制高压可燃气体的流量。可燃气体进入燃料电池后，可将其内部残留的水分排出，从而实现应急吹扫功能。该方法能够在空压机失效的情况下，依然保障燃料电池的安全停机与维护。

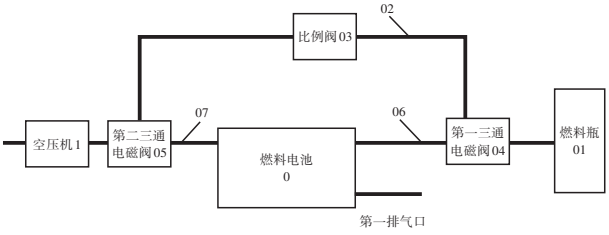


图26　利用氢气储气瓶吹扫阴极[44]

3　结束语

本研究表明，燃料电池车辆的吹扫技术不仅涉及单一的物理除水、除氢，而是一项需在整车能效、动态性能恢复、耐久性及安全性等多重边界条件下寻求最优解的系统性工程。在工程化应用中，由于运行工况具有显著的差异性，单一的吹扫方案难以在全域工况下实现性能与成本的双赢。当前研发中常采用的单一优先级策略或针对离散工况设计的独立方案，分别存在工况适应性差及系统冗余度高的问题，导致控制逻辑复杂化并增加了潜在故障风险。

因此，未来研究应致力于开发具备工况自适应能力的通用化吹扫架构。该架构需建立统一的调控机制，能够根据实时工况特征，动态优化吹扫介质、对象、关键参数及终止条件，从而在降低系统复杂度的同时，实现全生命周期内综合效益的最大化。

参　考　文　献

[1] WANG F, ZHANG H, LIU M, et al. An Effective PEMFC System Shutdown Purge Strategy for Improving the Purging Effect of Liquid Water and the Dehydration of Stack[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(74): 28891-28905.

[2] PEI Y, CHEN F, JIAO J, et al. Analysis and Control Strategy Design for PEMFC Purging Process[J]. Energy, 2024, 290: 130233.

[3] 陶恒阳. 水下氢氧PEMFC二维瞬态建模仿真及吹扫策略研究[D]. 天津: 天津大学, 2022.

[4] KIM Y S, KIM S I, LEE N W, et al. Study on a Purge Method Using Pressure Reduction for Effective Water Removal in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(30): 9473-9484.

[5] SHI L, TANG X, XU S, et al. Comprehensive Analysis of Shutdown Purge Influencing Factors of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Based on Water Heat Transfer and Water Vapor Phase Change Mechanism[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 239: 122175.

[6] PAN H, XU L, CHENG S, et al. Control-Oriented Modeling of Gas Purging Process on the Cathode of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell During Shutting Down[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(29): 18584-18594.

[7] SHI L, LIU P, ZHENG M, et al. Numerical Study on the Mechanism of Water and Gas Phase Transition and Water Redistribution after Purging Based on Two-Dimensional Multi-Phase Model, Energy Conversion and Management, 2023, 278: 116725.

[8] 王义琳. 基于参数辨识的燃料电池阻抗测量方案研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2023.

[9] 王伟强, 贾莉, 郭凤刚, 等. 燃料电池发动机低温冷吹扫技术研究[J]. 汽车与配件, 2024(10): 68-70.

[10] 刘灿, 许思传, 刘鹏程, 等. 质子交换膜燃料电池停机吹扫研究进展[C]// 第四届上海-斯图加特汽车及动力技术国际研讨会论文集, 2019: 88-94.

[11] 上海捷氢科技股份有限公司. 一种燃料电池的吹扫方法、燃料电池系统和燃料电池车辆: CN202210109116.3[P]. 2024-04-26.

[12] 中汽创智科技有限公司. 一种燃料电池系统、吹扫控制方法、电子设备及存储介质: CN202111177455.7[P]. 2024-04-16.

[13] 刘威. 质子交换膜燃料电池吹扫除水与低温冷启动研究[D]. 湖北: 武汉理工大学, 2009.

[14] 北京亿华通科技股份有限公司. 一种提高燃料电池系统冷吹扫效果的方法及系统: CN202410563950.9[P]. 2024-08-13.

[15] LIU Z, CHEN H, ZHANG T. Review on System Mitigation Strategies for Start-Stop Degradation of Automotive Proton Exchange Membrane Fuel Cell[J]. Applied Energy, 2022, 327: 120058.

[16] CHO E, KO J J, HA H Y, et al. Effects of Water Removal on the Performance Degradation of PEMFCs Repetitively Brought to <0 ℃ [J]. Journal of The Electrochemical Society, 2004, 151(5): A661.

[17] 北京亿华通科技股份有限公司. 燃料电池系统的停机吹扫方法及燃料电池系统、车辆: CN202011191367.8[P]. 2023-07-14.

[18] 广东国鸿氢能科技有限公司. 燃料电池阴极系统、吹扫系统、燃料电池的阴极吹扫方法: CN201810318894.7[P]. 2018-09-28.

[19] 上海汽车集团股份有限公司. 一种燃料电池阴极吹扫系统、吹扫方法和车辆: CN202011362845.7[P]. 2022-05-31.

[20] 厦门金龙联合汽车工业有限公司. 一种长寿命单电堆燃料电池的阴极吹扫系统: CN202221857639.8[P]. 2022-11-29.

[21] 东风汽车集团股份有限公司. 一种燃料电池车吹扫系统和吹扫方法: CN202111279826.2[P]. 2023-08-29.

[22] 罗伯特•博世有限公司. 用于对燃料电池进行吹扫的装置和方法: CN2021126391W[P]. 2023-05-04.

[23] 广东云韬氢能科技有限公司. 一种用于氢气尾排回收用于停机阳极吹扫装置: CN202321018416.7[P]. 2023-12-19.

[24] 特嗨氢能检测(保定)有限公司. 吹扫系统及车辆: CN202322249394.1[P]. 2024-03-22.

[25] 潍柴动力股份有限公司. 燃料电池的吹扫系统及燃料电池的吹扫系统的吹扫方法: CN202210796232.7[P]. 2024-01-12.

[26] 重庆地大工业技术研究院有限公司. 一种燃料电池的氮气吹扫系统: CN202021974521.4[P]. 2021-04-27.

[27] 上海鸿芯氢能科技有限公司, 国鸿氢能科技(嘉兴)股份有限公司. 一种吹扫系统: CN202322603240.8[P]. 2024-05-28.

[28] 潍柴动力股份有限公司. 一种燃料电池系统的吹扫方法及燃料电池系统: CN202111165137.9[P]. 2023-01-24.

[29] 深圳国氢新能源科技有限公司. 一种燃料电池低温存储的吹扫方法: CN201810236788.4[P]. 2018-08-31.

[30] 中国第一汽车股份有限公司. 燃料电池发动机的冷启动吹扫方法、装置、设备及介质: CN202311362111.2[P]. 2024-02-27.

[31] 潍柴动力股份有限公司. 燃料电池吹扫系统的控制方法与燃料电池吹扫系统: CN202211009641.4[P]. 2022-11-11.

[32] 上海重塑能源科技有限公司. 空气子系统、氢燃料电池及氢燃料电池中框体吹扫方法: CN202210976101.7[P]. 2022-10-14.

[33] 深蓝汽车科技有限公司. 燃料电池汽车的吹扫控制方法、装置、汽车、设备及介质: CN202411157562.7[P]. 2024-11-08.

[34] 潍柴动力股份有限公司. 一种吹扫电路的控制电路、吹扫电路以及车辆: CN202221545875.6[P]. 2022-10-25.

[35] 北京亿华通科技股份有限公司. 一种燃料电池吹扫方法、燃料电池、车辆、存储介质及计算机: CN202210338757.6[P]. 2023-10-24.

[36] 现代自动车株式会社,起亚自动车株式会社. 具有氧传感器的燃料电池系统及其控制方法: CN201811497619.2[P]. 2024-10-15.

[37] 唐山锐唯新能源科技有限公司. 一种燃料电池系统和开机阳极吹扫方法: CN202311634781.5[P]. 2024-01-30.

[38] 三一汽车制造有限公司. 燃料电池系统及其吹扫控制方法、吹扫控制装置: CN202311239771.1[P]. 2023-12-01.

[39] 上海重塑能源科技有限公司. 一种燃料电池的氮气吹扫保护装置: CN202320045928.6[P]. 2023-08-04.

[40] 山东大学. 一种燃料电池冷启动阳极吹扫装置及吹扫方法: CN201910487632.8[P]. 2021-01-22.

[41] 上海恒劲动力科技有限公司. 一种燃料电池系统及其停机和启动时吹扫和排水的方法: CN201811089463.4[P]. 2021-11-02.

[42] 武汉理工大学, 武汉雄韬氢雄燃料电池科技有限公司. 一种燃料电池阳极吹扫的控制方法: CN202311827773.2[P]. 2024-05-03.

[43] 北京亿华通科技股份有限公司. 一种用于燃料电池发动机的吹扫装置: CN202310915983.0[P]. 2023-10-20.

[44] 潍柴动力股份有限公司. 一种燃料电池应急吹扫系统和燃料电池系统: CN201920828486.6[P]. 2020-01-31.

（责任编辑　**明慧**）