

车载供氢系统发展现状及展望

张杰¹, 宋科¹, 张瀚², 曾云¹, 郑鹏³

(1. 石油天然气装备教育部重点实验室(西南石油大学), 四川省 成都市 610500; 2. 阿尔伯塔大学机械工程系, 埃德蒙顿 T6G2G8, 加拿大; 3. 风氢源科技(苏州)有限公司, 江苏省 苏州市 215104)

Development Status and Prospects of Onboard Hydrogen Supply Systems

ZHANG Jie¹, SONG Ke¹, ZHANG Han², ZENG Yun¹, ZHENG Peng³

(1. Key Laboratory of Oil & Gas Equipment of Ministry of Education (Southwest Petroleum University), Chengdu 610500, Sichuan Province, China; 2. Department of Mechanical Engineering, University of Alberta, Edmonton T6G2G8, Canada; 3. Wind Hydrogen Source Technology (Suzhou) Co., Ltd., Suzhou 215104, Jiangsu Province, China)

摘要:【目的】车载供氢系统作为氢燃料电池汽车的核心部件, 如何实现供氢系统的氢气完全循环利用及提高氢气利用率, 已成为制约氢燃料电池汽车发展的关键瓶颈之一, 因此对车载供氢系统发展现状进行了分析。【方法】介绍了车载供氢系统的基本工作原理, 概述了6种回氢循环供氢系统与2种非循环供氢系统模式的结构组成、工作原理和发展现状, 对比了不同模式供氢系统的优缺点; 梳理了车载供氢系统中储氢瓶、加氢模块、组合阀等关键部件的技术现状, 并对减压阀、过流阀、手动阀等核心阀件发展现状进行了分析; 最后, 对车载供氢系统的发展趋势和攻关方向进行了展望。【结论】供氢系统循环模式是未来主要发展方向; 先进信息技术、自动控制技术及智能决策算法等将逐步用于车载供氢系统; 车载供氢系统各部件逐渐向轻量化、高可靠性、低成本、标准化和模块化方向发展。

关键词: 氢燃料电池; 氢能; 车载供氢系统; 回氢循环; 供氢模式; 储氢; 组合阀

ABSTRACT: [Objectives] The onboard hydrogen supply system serves as a core component of hydrogen fuel cell vehicles. How to achieve complete hydrogen gas recycling and improve hydrogen utilization efficiency have become one of the key bottlenecks limiting the development of hydrogen fuel cell vehicles. Therefore, an analysis of the current development status of onboard hydrogen supply systems is conducted. [Methods] This paper introduces the basic working principles of onboard hydrogen supply systems, and summarizes the structure, working principles, and

development status of six types of hydrogen-recycling supply systems and two types of non-recycling supply systems. The advantages and disadvantages of different hydrogen supply system modes are compared. The technical status of key components in onboard hydrogen supply systems, such as hydrogen storage cylinders, hydrogen refueling modules, and combination valves is reviewed. Additionally, the development status of core valves such as pressure relief valves, overcurrent valves, and manual valves is analyzed. Finally, the development trends and research directions for onboard hydrogen supply systems are discussed. [Conclusions] The recycling mode of hydrogen supply systems is the main development direction for the future. Advanced information technologies, automatic control technologies, and intelligent decision-making algorithms will be gradually applied to onboard hydrogen supply systems. The components of onboard hydrogen supply systems will gradually evolve towards lightweight, high reliability, low cost, standardization, and modularization.

KEY WORDS: hydrogen fuel cell; hydrogen energy; onboard hydrogen supply system; hydrogen recovery cycle; hydrogen supply modes; hydrogen storage; combination valves

0 引言

氢能作为一种清洁能源载体, 因其高能量密度和使用过程中无污染等优点, 被认为是实现可持续发展的关键之一。氢能在交通领域的应用主要是氢燃料电池汽车, 其具有零排放、长续航、补能快、耐低温等特点, 可在特定场景下弥补现

基金项目: 国家自然科学基金项目(52104223)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52104223).

有燃油车和纯电动汽车的诸多不足。车载供氢系统作为燃料电池汽车的核心部件，主要用于氢气储存和调压后的氢气输出，其安全性、高效性、可靠性对氢燃料电池汽车的发展至关重要。

车载供氢系统主要包括加氢模块、储氢模块、供氢模块和控制监测模块。储氢瓶中的氢气经组合阀减压、稳压后，输入燃料电池反应堆入口处，并与氧气在燃料电池反应堆中发生化学反应，进而产生电能，驱动电动机推动汽车行驶。如何实现供氢系统的氢气完全循环利用，并提高氢气利用率，已成为制约氢燃料电池汽车发展的关键瓶颈之一。

本文介绍了车载供氢系统的工作原理，概述

了6种回氢循环供氢系统与2种非循环供氢系统模式的结构组成、工作原理和发展现状，梳理了车载供氢系统中储氢瓶、加氢模块、组合阀等关键部件的技术现状，最后对车载供氢系统的发展趋势和攻关方向进行了展望。

1 供氢系统工作原理

车载供氢系统包括储氢瓶、瓶口阀、组合阀、汽水分离器、管路和接头等零部件。组合阀包含阀体、过滤系统、减压阀系统、安全阀、阀体通道、卸荷阀、过流阀、电磁阀及截止阀。根据氢气供应系统的不同需求，还配有单向阀、传感器等，如图1所示。

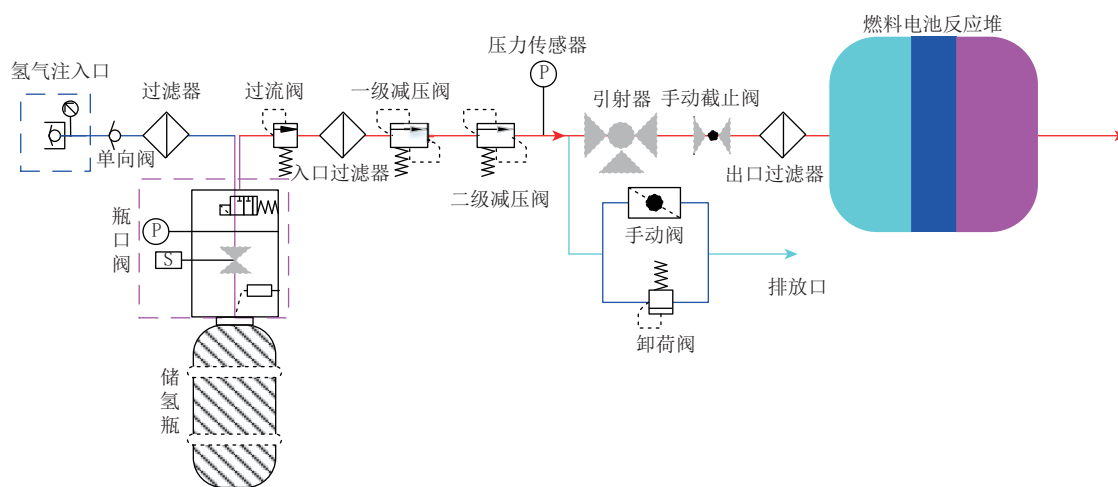


图1 供氢系统结构组成及原理流程

Fig. 1 Structural and principle flow of hydrogen supply system

供氢系统基本工作原理为：首先，储氢瓶释放氢气经过瓶口阀检测温度和压力，过流阀检测流量并确定温压参数是否在设计允许范围内，如果不在，则启动紧急卸荷装置或过流泄压装置；其次，氢气通过入口过滤器进行净化去除杂质，根据减压阀功能和瓶口压力不同，设计一级和二级减压阀降低氢气压力，以提供适量氢气给最后一级减压稳压装置，确保氢气进入燃料电池电堆前具备合适压力和流量；最后，氢气通过出口过滤器再次净化，并输送至燃料电池反应堆入口处。为提高系统安全性，设置过压卸荷阀防止减压阀失效造成高压气体损坏阀后器件，设置手动阀用于排放电堆前残留气体。同时，整个系统还包括截止阀和安全阀等安全系统^[1]。

供氢系统工作模式可分为循环模式与非循环模式，为保证燃料电池性能及氢气利用率，通常采用氢气循环模式，引射器与循环泵作为供氢系统循环模式的关键部件，可以将燃料电池反应堆出口未反应的氢气通过汽水分离器过滤掉杂质，循环回燃料电池反应堆进口，从而提高氢气的利用率，保证氢气的循环使用，同时保证燃料电池的性能。

2 供氢系统工作模式

2.1 循环模式

2.1.1 单引射器回氢模式

单引射器回氢模式的核心思想是通过引射器来控制氢气循环，以实现氢气有效回收和再次利

用，具有结构简单、噪声低和无需额外的能源消耗等优点，其原理如图2所示。现代汽车公司的Nexo燃料电池车采用单引射器模式^[2]，可以将未反应氢气再循环，提高了氢气利用率。然而该模式存在工作范围有限、低功率下可靠性低以及主动调节能力弱等不足。为此，本田在燃料电池汽车FCX Clarity中采用可变喷嘴引射器回氢技术方案实现氢气循环利用^[3]，这种引射器通过调整引射器口截面积，解决了低功率区间可靠性不足的问题，且能够根据需要自适应地调整氢气再循环率，以适应不同流量氢气需求。该技术克服了传统单引射器回氢模式的某些限制，使氢气再循环变得更加灵活与高效，但复杂的结构也增大了其

体积、质量及成本。另外，重庆长安新能源汽车公司提出一种燃料电池氢气循环系统及控制方法^[4]，采用引射器与汽水分离器集成化设计方案，实现高效稳定氢气循环系统；武汉格罗夫氢能汽车公司提出一种燃料电池阳极氢气循环系统及其控制方法^[5]，采用引射器与电磁阀相结合的模式，以脉冲供氢的方式向燃料电池反应堆输入氢气，从而解决负载过小时缓冲罐内存储的残余氢气无法利用的问题以及实现氢气的循环利用，减少氢气的浪费。亿华通提出一种燃料电池供氢系统以及车辆^[6]，采用引射器与三通阀集合的方案，通过脉冲开关，使管路内氢气形成脉冲气流，从而实现氢气的循环利用。

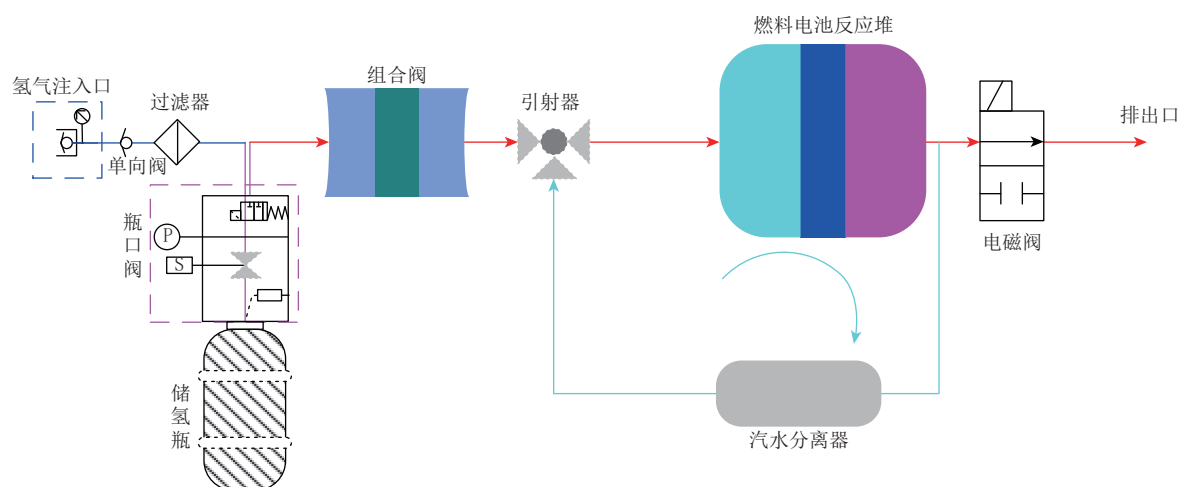


图2 单引射器回氢模式

Fig. 2 Single-injector hydrogen recovery mode

2.1.2 双引射器回氢模式

美国DTI公司在2010年提出一种双引射器回氢模式设计方案^[7]，该模式采用2个不同流量引射器，以满足燃料电池系统在不同功率范围内氢气需求，其原理如图3所示。当燃料电池反应堆需要高功率输出时，系统选择使用高流量引射器进行氢气循环以满足电堆氢气需求，而当燃料电池反应堆在低功率工作范围时，系统会切换到低流量引射器进行氢气循环，确保氢气供应仍然充足。这种双引射器回氢模式拓展了系统的操作范围，使其能够灵活应对不同功率燃料电池反应堆使用需求。然而该系统的设计和控制策略相对复杂，成本、体积、质量也有所增加，且需要精密控制

算法和传感器技术实现智能切换引射器，确保在不同功率工况下保持最佳性能。北京亦嘉洁驱系统科技提出质子交换膜氢燃料电池供氢系统及控制方法^[8]，采用双引射器及各部件集成化设计方案实现氢气的循环利用；涂正凯等^[9]提出一种质子交换膜燃料电池双引射器循环系统，使用阳极引射器和阴极引射器分别将氢气和氧气引入混合室，室内低压区将未反应氢气吸入，然后氢气或氧气与尾气在此处进行动量和质量交换后同时进入电堆，实现氢气的循环利用；擎能动力科技提出了一种双引射器系统^[10]，采用高功率引射器与低功率引射器相并联设计，以满足燃料电池汽车在不同功率使用要求。

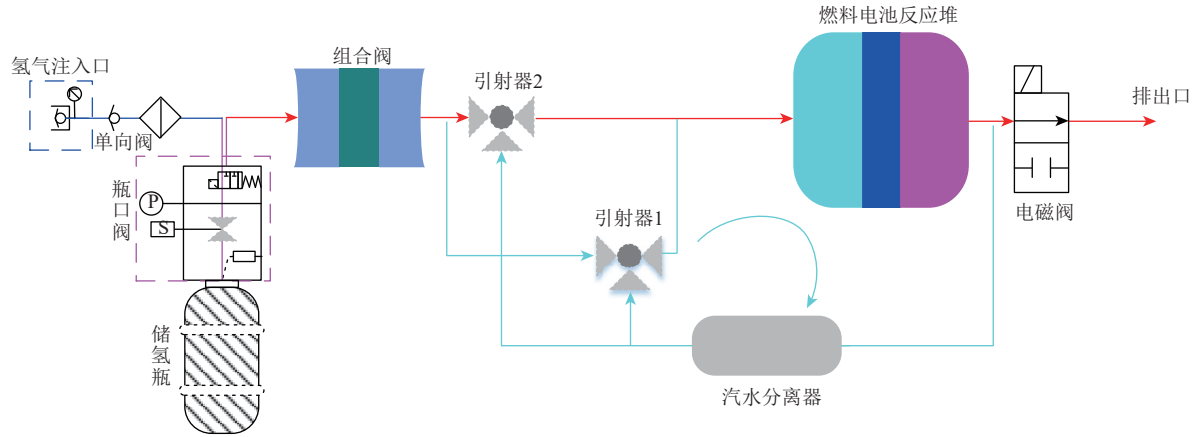


图3 双引射器回氢模式
Fig. 3 Dual-injector hydrogen recovery mode

2.1.3 单循环泵回氢模式

单氢气循环泵回氢模式通过采用氢气循环泵，将未经反应氢气和透过膜的水分通过汽水分离器重新引导至燃料电池反应堆入口，实现氢气再次循环利用，其原理如图4所示。该系统结构简洁紧凑、响应速度极快、适用范围广泛，且能主动响应燃料电池工作状态进行智能调节。丰田的FCHV系列和Mirai车型采用单氢气循环泵回氢方案^[11]，其氢循环泵技术已经发展到第3代，在这一过程中，氢循环泵设计经历了从涡旋式到罗茨式的改进^[12]，旨在提高氢气压缩效率和可靠性，以便更有效地回收和利用车辆尾气中的氢气。但氢气循环泵在燃料电池中的集成和应用受到多种制约因素，包括成本、体积、质量、额外能耗、振动和噪声等。Hwang等^[13]研发了一辆功率5 kW的氢燃料电池汽车，提出采用单循环泵模式来提高氢气利用率。中国一汽提出了一种燃料电池湿度控制方法及装置^[14]，燃料电池反应堆的阳极入口分别与氢气循环泵和氢气供应系统相连，可以显著增加电池堆内部湿度，同时提高氢气利用率。

的改进^[12]，旨在提高氢气压缩效率和可靠性，以便更有效地回收和利用车辆尾气中的氢气。但氢气循环泵在燃料电池中的集成和应用受到多种制约因素，包括成本、体积、质量、额外能耗、振动和噪声等。Hwang等^[13]研发了一辆功率5 kW的氢燃料电池汽车，提出采用单循环泵模式来提高氢气利用率。中国一汽提出了一种燃料电池湿度控制方法及装置^[14]，燃料电池反应堆的阳极入口分别与氢气循环泵和氢气供应系统相连，可以显著增加电池堆内部湿度，同时提高氢气利用率。

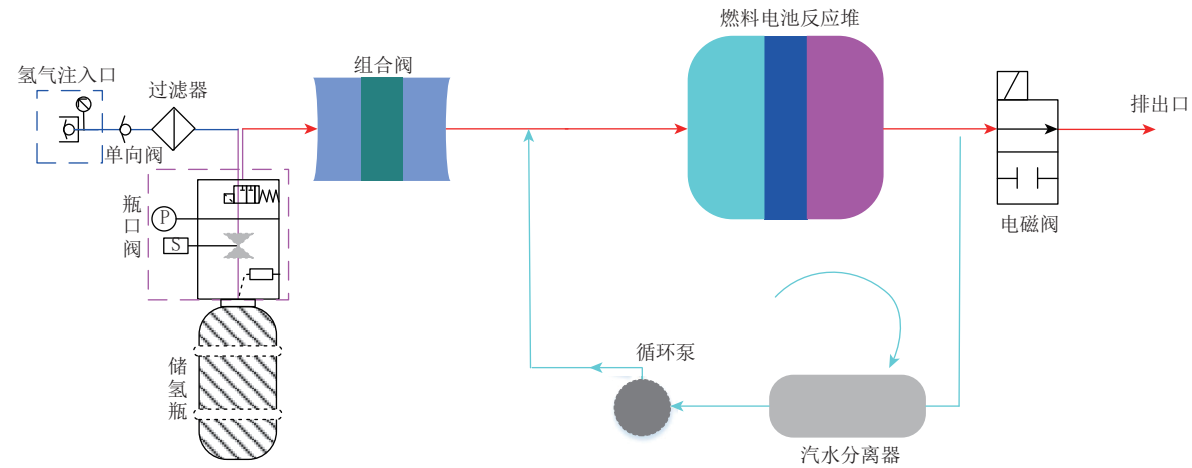


图4 单循环泵回氢模式
Fig. 4 Single-circulation pump hydrogen recovery mode

2.1.4 循环泵与引射器结合模式

2008年 ARGONNE 研究中心提出一项新型燃料电池系统的阳极供氢方案，氢循环泵与引射器在回氢模式下并联使用，小功率、小流量工况下利用氢循环泵对氢气进行主动循环，高功率、大

流量工况下采用引射器对氢气进行被动循环。该设计有助于避免氢气循环泵在电堆高功率时浪费能量，同时解决了引射器在电堆低功率时效果不佳问题，然而该方案使得系统复杂性、成本及系统控制难度均有所增加。未来能源科技提出了引

射器和氢气循环泵相结合模式，具有系统效率高、高度集成化以及控制精准化的优点，该模式在不同系统工况下能进行自适应控制，进而使整个系统处于最优状态。但该方案使系统更加复杂，系统控制变得更加困难，且会增加成本。

邢子义等^[15]提出将氢循环泵与引射器并联使用的集成化燃料电池供氢系统循环模式，已成功

地解决传统管路连接方式中需现场进行装配、管道连接复杂、操作繁琐、安装效率低下等诸多问题；李勇等^[16]提出一种燃料电池供氢系统及其应用的燃料电池系统，采用引射器与循环泵的一体化设置，能同时应对低功率和高功率不同进氢需求，实现进氢调节和回氢调节并行操作。循环泵与引射器结合模式如图5所示。

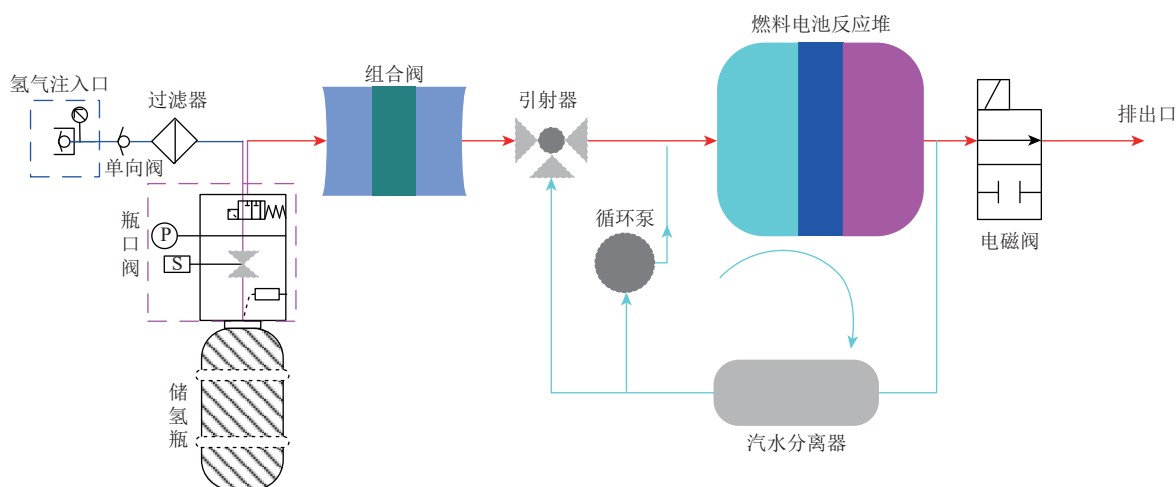


图5 循环泵与引射器结合模式

Fig. 5 Combined mode of circulating pump and injector

2.1.5 喷射器与引射器并联回氢模式

确保燃料电池阳极侧能够获得足够高浓度氢气供应至关重要，同时还需要定期清除产生的杂质和水分。为解决传统引射器回氢模式清除杂质和水分方面的困难，JAMES等^[17]提出一种改进方

案，即引入喷射器，如图6所示。该方案主要目的是在传统引射器回氢模式基础上并联喷射器，增加对燃料电池阳极侧氢气吹扫效率。这种吹扫有助于燃料电池阳极侧始终获得足够氢气供应，并维持较高氢气浓度，通过定期吹扫，可有效清

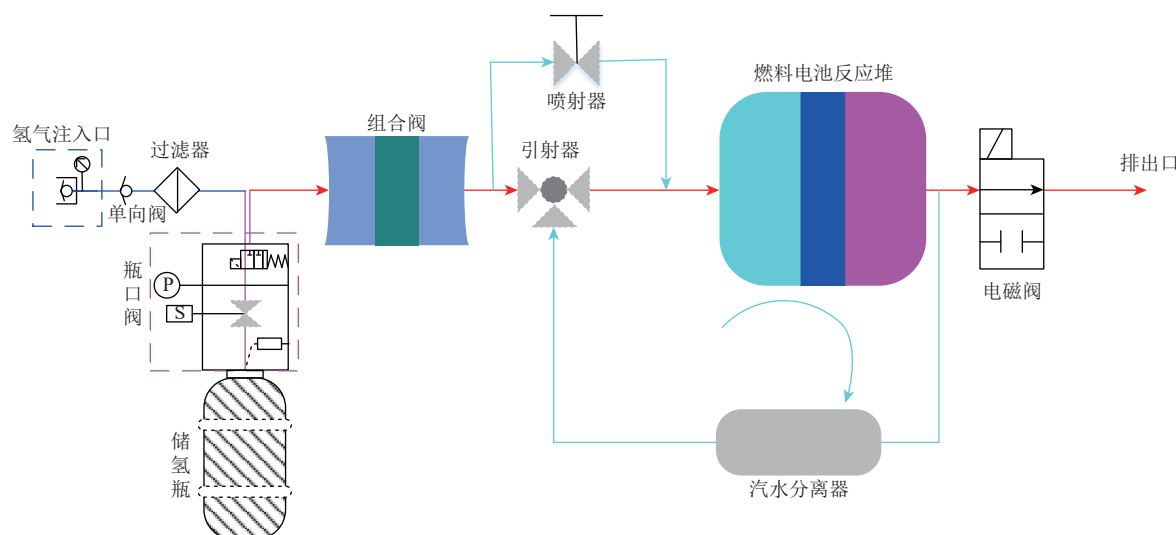


图6 喷射器与引射器并联回氢模式

Fig. 6 Parallel hydrogen recovery mode of injector and ejector

除杂质和水分，提高燃料电池性能和稳定性。尽管如此，引射器在低功率和小流量阶段仍然存在引射效果，且尚未得到解决。本田在 FCV Clarity 燃料电池汽车上研发一种引射器与喷射器集成化设计，通过固定喷嘴引射器和双喷射器协同工作，系统供氢和回氢性能显著提高^[18]。北京亿华通提出一种燃料电池多功能氢喷及燃料电池系统^[19]，将喷射器和引射器集成化设计，利用喷射器释放氢气时所产生动力带动氢气流动循环，以替代传统氢气循环泵，该系统可根据不同工况需求调整氢气喷射量、确保持续供氢。

2.1.6 压力回氢模式

马明辉等^[20]对一种压力回氢模式进行分析，该系统由 2 个单向阀、汽水分离器和组合阀等组

成，通过改变燃料电池反应堆阳极与阴极压力变化，使其能够进行氢气循环供应，具体实施过程是在使用单向阀情况下通过控制供氢量来调整燃料电池反应堆压力差，使其实现氢气自动循环，该模式因其结构简单、控制策略简洁、易于实现等特点而备受关注。南泽群等^[21]对压力回氢模式进行研究，发现该模式通过流量控制装置调节燃料电池反应堆压力变化实现氢气循环。UNO 等^[22]研发出一种压力变化回氢模式，通过压力波动来实现氢气循环，然而该模式存在一些限制和挑战，如响应速度相对较慢，需要一定时间适应外部变化，氢气压力存在较大波动，且可能会引发电堆性能不一致性，工作原理如图 7 所示。

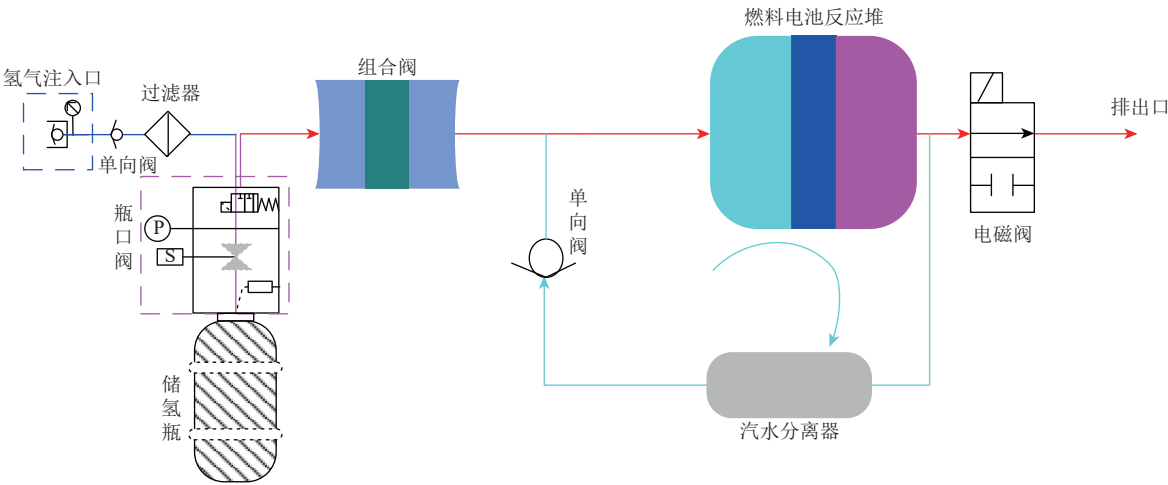


图 7 压力回氢模式原理
Fig. 7 Principle of pressure hydrogen recovery mode

2.2 非循环模式

2.2.1 直排流通模式

Ahluwalia 等^[23]提出直排流通模式，其原理如图 8 所示。直排流通模式是在无氢气再循环系统情况下，直接向外界排放未发生化学反应氢，该模式具有结构简单、成本低等优点^[20]。但由于受限于传质、反应效率等，进入燃料电池负极处的氢不能充分参与化学反应。大量未发生化学反应的氢被直接排放到环境中，不仅存在一定安全风险，还会影响氢利用效率及发电效率。未反应氢气包含许多湿气，若无阳极增湿装置，将其直接排出，将造成质子交换膜干燥，引发燃料电池内

湿度不平衡，影响其工作效率与使用寿命。

2.2.2 死端模式

CHEN 等^[24]提出死端模式，在供氢系统中封住供氢系统气体出口，使得氢气在电池堆内停留时间延长，有助于确保更多氢气参与电化学反应，提高能源转化效率。但燃料电池正常工作条件下，空气中其他气体会在压差或浓度梯度作用下发生反扩散，并聚集到阳极一侧，随着氢气循环时间增加，这些杂质在阳极侧积聚程度也会增加，从而降低氢气纯度。同时，阴极侧反扩散也会将水分输送到阳极侧，可能导致阳极侧出现水淹情况，导致氢气供应不足，降低燃料电池发电性能。

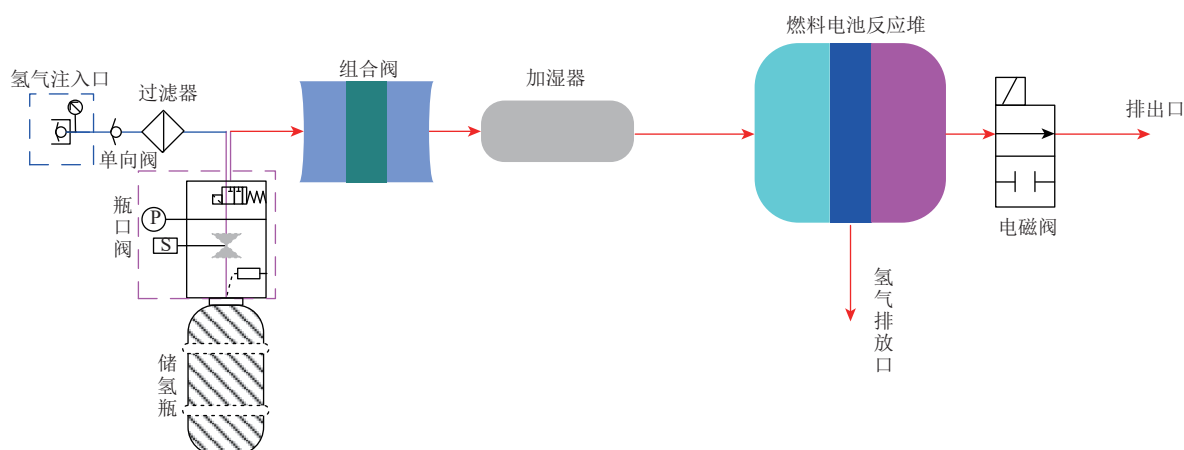


图8 直排流通模式原理

Fig. 8 Principle of straight-through flow mode

图9为死端模式原理，根据图9所示实验装置，通过在电池堆阳极出口设置并保持阀门关闭状态，使燃料电池处于死端模式下运行。随着电池堆运行时间增加，阳极侧氮气会逐渐渗透到阳极中，同时水也会在反应中生成并在阳极出口积聚，导致氢气流通通道被堵塞，阻碍氢气与催化剂充分接触，导致电池电压逐渐下降^[25]。Dumercy等^[26]利用MATLAB对死端模式下燃料电池反应堆进行仿真，发现影响燃料电池性能的原因是阳极聚集液态水。Moçotéguy等^[27]研究发现，死端模式下燃料电池反应堆阳极聚集大量液态水，造成燃料电池性能下降。Siegel等^[28]利用成像技术观察死端模式下燃料电池反应堆，发现阳极液态水含量

与燃料电池电压成反比，阳极液态水聚集越多，则燃料电池电压越低。综上，通过对燃料电池运行特性研究，认为死端模式下电池堆阳极会积聚大量液态水、氮气以及其他杂质气体，这是燃料电池电压快速下降的主要原因。因此，需要进一步探索解决这一问题以提高氢燃料电池稳定性和效能，Choi等^[29]对有氢气脉动和无氢气脉动进行实验研究，发现死端模式下采用有氢气脉动可减缓燃料电池电压降低速率。

3 供氢系统关键部件

3.1 储氢瓶

目前常见储氢技术包括高压气态储氢、低温液态储氢、固态储氢、有机物液体储氢。其中，高压气态储氢技术是目前发展最成熟、采用最多的车载储氢技术，具有成本较低、充放氢气速度快等特点，是发展最成熟的储氢技术^[30]。储氢瓶是高压气态储氢的核心设备，常用工作压力为35 MPa和70 MPa^[31]。目前储氢瓶可分为纯钢质金属型(I型)、钢制内胆纤维缠绕型(II型)、铝内胆纤维缠绕型(III型)、塑料内胆纤维缠绕型(IV型)以及无内胆纤维缠绕型(V型)，其中V型储氢瓶尚在研发中。前4种类型的储氢瓶性能对比如表1所示。I、II型储氢瓶储氢能力相对较低，随着材料强度增加，金属易发生氢脆现象，无法满足车载储氢要求。III型、IV型储氢瓶由内胆、碳纤维强化树脂层和玻璃纤维强化树脂层构成，从而

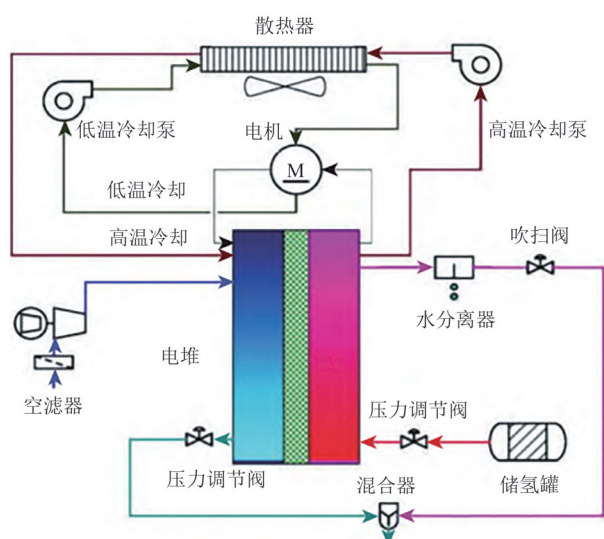


图9 死端模式原理

Fig. 9 Principle of dead-end mode

降低储氢瓶本身质量，增加储氢质量密度，可以达到车载储氢要求。2010 年浙江大学成功研制出 70 MPa 轻质铝内胆纤维缠绕储氢瓶，解决了高抗疲劳性能的缠绕线形匹配、超薄铝内胆成型等关键技术，其单位质量储氢密度达到

5.7%^[32]。目前国内商业化应用主要以 35 MPa 的Ⅲ型瓶为主，70 MPa 的Ⅳ型处于研发之中，部分企业已研制出样品^[33-34]。美国 Quantum、通用汽车、日本丰田等国外企业已成功研制多种规格Ⅳ型储氢瓶，并实现商业化应用。

表1 储氢瓶性能对比

Tab.1 Performance comparison of hydrogen storage cylinders

参数	I 型	II 型	III 型	IV 型
材质	纯钢质金属	钢制内胆纤维	铝内胆纤维	塑料内胆纤维
工作压力/MPa	17.5~20.0	26.3~30.0	30.0~70.0	>70
质量体积比/(kg·L ⁻¹)	0.90~1.30	0.60~0.95	0.35~1.00	0.30~0.80
使用寿命/a	15	15	15~20	15~20
储氢密度/(g·L ⁻¹)	14.28~17.23	14.28~17.23	40.40	48.80
可否车载	否	否	是	是
成本	低	中等	最高	高
发展状况	国内外技术成熟	国内外技术成熟	国内外技术成熟,国内已商业化	国外技术成熟,国内已开发出产品

3.2 加氢模块

加氢模块包含加氢口、压力表、过滤器、单向阀等功能阀件，通过与加氢枪连接实现为车辆加注氢气功能。其中，加氢口是指连接车辆与加氢枪所连接所有组件，包括多个部件。由于车辆在各种复杂环境下运行，易导致杂质进入加氢口。高压条件下杂质可能会被挤压进密封圈内，如果密封圈长时间受到带有杂质氢气影响，易发生磨损，可能导致加氢时密封性能下降，引发氢气泄漏，发生氢气爆炸等安全风险。曹宽等^[35]提出一项用于检测加氢口是否存在氢气泄漏的技术，在每次加氢后会检测加氢口氢气浓度，根据浓度值来判断是否存在加氢口故障。唐潘宇等^[36]设计了一种用于加注氢气的加注口，应对在实际操作中可能出现的密封性问题。刘仁豪等^[37]使用双重密封设计提高了加氢口的密封可靠性和使用寿命。

3.3 组合阀

供氢系统设计中系统体积有严格要求，不同模块的集成至关重要。组合阀主要包括减压阀、过滤器、单向阀、卸荷阀和手动阀等。过滤器的作用是净化氢气、拦截杂质，确保氢气纯度，主要原因是杂质可能损害其他组件，特别是减压阀密封面。减压阀主要功能是将高压氢气减压到下游电堆供应所需的恒定低压，当不需要氢气供应时减压阀可闭锁、切断氢气供应，确保系统安

全性。单向阀允许氢气在一个方向上流动，同时防止氢气在相反方向流动，有助于确保氢气按照设计方向流动。氢气排放管路上连接有卸荷阀和手动阀，其功能是当减压阀发生闭锁故障，造成出口压力超出容许值时，通过氢气排出管路泄放超压氢气，保证燃料电池反应堆不因超压而受损。组合阀原理流程如图 10 所示。

刘扬等^[38]提出一种由电磁阀、减压阀、手控阀等组成的高压储氢瓶瓶口组合阀结构，其结构形式对供氢系统的结构依赖程度高，可为高压供氢系统研发积累丰富的经验。Yamashita 等^[39]提出一种 70 MPa 压力级瓶口组合阀的组合形式，由手动截止阀、过滤器、电磁阀、止回阀组成，但没有包含节流阀和减压阀。Hausmann^[40]设计了一种瓶口阀结构，充氢路径是由充氢口、过滤器、手动阀、止回阀到储氢瓶内部，供氢路径是将限流阀、止回阀、过滤器、电磁阀和手动阀连接到供氢口，热动作压力泄放装置与储氢瓶直接相连，另外还设有手动放压阀，以在紧急情况下释放压力。何春辉等^[41-42]提出 70 MPa 车载高集成瓶口组合阀结构，其将减压阀与瓶口阀集成在一起，能够达到分级降压、逐级增大降压、逐级降低压力的目的。国宁等^[43]设计了一款车载氢能高集成瓶口组合阀。王冰等^[44]提出一种供氢组合阀门，由溢流阀、单向阀、过滤阀、管路电磁阀和减压阀

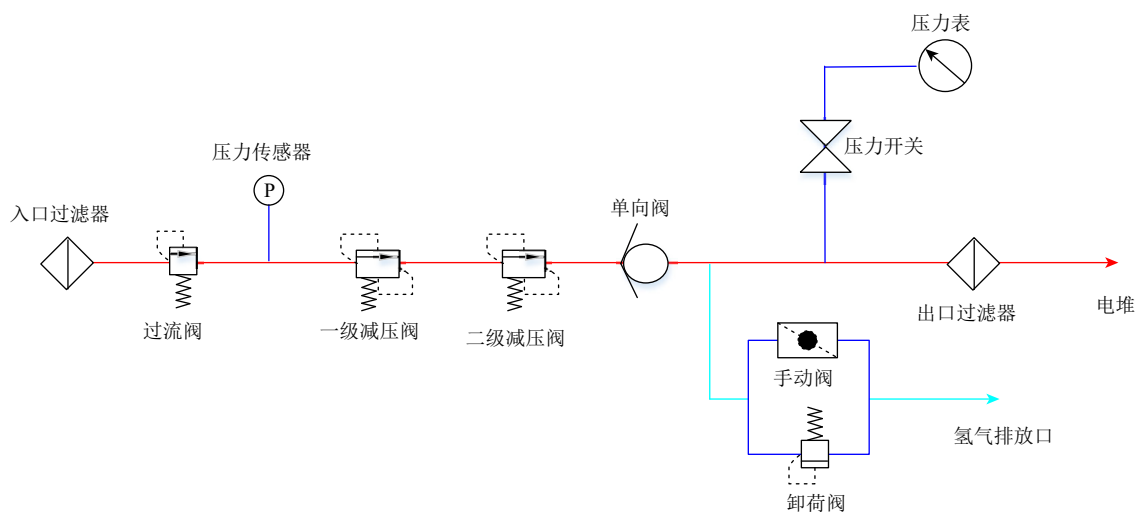


图10 组合阀原理

Fig. 10 Principle of combination valves

组成。焦杰等^[45]提出一种 35 MPa 压力级的集成式组合阀，包括主减压阀、定差减压阀和电磁阀，按照串联方式连接在一起，建立该组合阀的仿真模型，仿真结果显示，该组合阀的体积和质量分别减少了 36.6% 和 28%，但其未考虑安全泄压通路。传统多级阀门串联供氢方式存在着管路复杂、结构分散、集成度低等问题，不仅使得车辆内部空间利用率低，而且松散结构也存在安全隐患^[46]。任圣哲等^[47]提出一种多功能组合阀用于车载供氢系统。钱锦远等^[48]提出一种具有流量调节与稳压功能的组合阀，采用一级减压阀、二级减压流量调节阀来实现氢气压力的降低和精确控制氢气流量。国内企业在 35 MPa 氢气组合式阀门领域已经拥有自主技术，也有少数企业在 70 MPa 氢气组合式阀门领域有一些突破，如富瑞阀门、未势能源、苏州久安通、上海瀚氢动力科技等宣称已研发出 70 MPa 系列氢用阀门。

1) 减压阀

减压阀是一种用于控制流体或气体压力的装置，通过调节进口压力来减少到达所需出口压力，并利用介质本身能量保持出口压力稳定。组合阀里的减压阀在减压能力和稳压效力方面具有较高要求，必须能应对大压力跨度减压需求，同时确保阀门后的压力保持稳定。侯松峰等^[49]提出一种新型密封结构的溢流式减压阀，在传统减压阀结构的基础上进行改进，并对其关键参数重新进行

匹配，并且证明改进后减压阀低温以及密封性能能够满足要求。Chen 等^[50]提出一种新型减压阀结构，由一个多级减压阀和一个多级消声器组成，对不同阀门开度下进行仿真。Li 等^[51]提出一种特斯拉型减压阀，并联特斯拉型通道与传统孔板结构集成在一起。Chen 等^[52]提出一种用于氢气减压的新型 L 型高压减压阀，基于参数敏感性分析对其优化设计。王剑等^[53]提出一种新型膜片式减压阀，从流量变化、阀门前后压力、试验压力源及运行温度进行试验参数分析。

国内企业已基本掌握入口压力 35 MPa 减压阀技术，少数企业致力于研发 75 MPa 以上减压阀，LW351 氢气减压阀入口压力最大为 35 MPa，出口压力最大为 0.3 MPa，适用于无人机。AUTO438 氢气减压阀入口压力最大为 43.8 MPa，出口压力最大为 2 MPa，适用于公共汽车和卡车。AUTO875 氢气减压阀入口压力最大为 87.5 MPa，出口压力最大为 2 MPa，适用于汽车。TESCOM 减压阀可实现 30 MPa 至 2 MPa 减压，适用于汽车。燃料电池堆氢气入口压力在 1.5~3.5 MPa，可将 TESCOM 减压阀作为一级减压阀，AUTO875 氢气减压阀作为二级减压阀，方可达到电堆氢气入口压力。目前减压阀应具有更强的自动化和智能化水平，特别是在车载供氢系统中，一些减压阀配备传感器和反馈控制系统，可根据实时压力变化自动调节阀门开度维持稳定压力输出。当前

部分减压阀往往具有较为复杂结构,能同时实现减压、减振、排污等多种功能。

2) 过流阀

过流阀是一种用于控制流体或气体系统中流量的装置,其工作原理是基于压力差,当流体压力升高到设定值时过流阀会打开,允许一部分流体流经阀门从而减少压力,一旦压力降低到合适范围,过流阀会关闭,阻止流体或气体流入。如南通神通新能源研发的FYL系列过流阀是为车载供氢系统设计开发的一款过流保护装置,下游高压管路发生断裂时,具备迅速截断高压管路功能,防止氢气大量溢出。张一建等^[54]设计了一种安全稳定的过流阀结构。赵益春等^[55]通过改变阀瓣的尺寸设计一种过流阀,通过流场分析方法获得过流阀升力变化曲线。史娜飞^[56]设计一种弹簧式大口径过流阀,经测试大口径过流阀满足设计要求。李鹏等^[57]针对过流阀泄漏问题进行了改进。

随着技术进步,过流阀精密控制能力和调节性能得到显著提升。新一代过流阀采用更先进传感器和控制系统,能更精确监测和调节流体流量以适应不同工况要求,还可以通过与控制系统联网实现远程监测和控制;智能过流阀还配备有自诊断功能,能够实时监测设备状态,提高设备可靠性和安全性。

3) 手动阀

手动阀是通过手动操作来控制流体或气体的阀门,通常用于不依赖自动化或电子控制的系统中。张奥等^[1]对常用手动阀进行研究分析,常用的手动开关阀包括截止阀、针阀、隔膜阀、膜片阀、球阀以及膨胀阀6种,各自具有不同特点和适用领域。截止阀具有一个升降式阀盖,通常由一个或多个螺杆来控制阀盖的升降,从而调整阀门的开启度,且具有操作简便、密封性好和可靠性高的特点。针阀具备流量可调功能,高压条件下展现出卓越密封性能,然而其与气体接触部分构件通常由金属制成,会对气体介质纯度造成不良影响。膜片阀是一种与外界完全隔绝的阀门,不会对气体纯度产生影响。隔膜阀利用膜层起到隔绝气体的作用,不会对气体纯度造成太大影响,具有卓越高压密封性能。球阀具备迅速开合、低

压差和方向切换便捷等优点,但高压条件下密封性能相对较不理想。膨胀阀是一种用于控制气体或液体流经管道或系统时压力的阀门,主要功能是在管道或系统中维持特定压力范围。根据具体需求和应用场景,可以选择适合的阀门类型以满足需求和要求。例如,上海巨良阀门的JL600-JH、JL900-DL型手动阀,可用于工业过程及燃料电池汽车供氢系统中压力与流量的调节。

为解决手动阀如何快速开启/关闭问题,Shi等^[58]提出一种新型手动阀快速开启/关闭执行机构设计思路。程强等^[59]针对以往手动换向阀动作缓慢、密封性不好等问题设计了一种新型手动换向阀。王浩等^[60]结合实际工作环境设计了一种高压手动截止阀,利用有限元法对各部件进行分析。

尽管自动化系统在许多领域日益普及,但手动阀仍在许多环境中被广泛应用,目前手动阀设计上更为精细,采用优化工程设计和耐用材料,以提高其可靠性和使用寿命。同时一些手动阀已经融合数字化技术,使其在数据采集、远程监控和维护方面更加便利。

4 结论

供氢系统在整个燃料电池系统中扮演着至关重要的角色,在确保安全可靠的情况下,其必须满足密封性、气体调压稳定性、高氢气利用率等要求。

1) 通过分析不同供氢系统工作模式,可知死端模式、直排流通模式不太适合商业化汽车应用,供氢系统循环模式被认为是未来主要发展方向,通过循环利用提高氢气利用效率和燃料经济性,有助于均匀分布阳极侧水分,利于水管理。

2) 先进信息技术、自动控制技术及智能决策算法等将逐步被用于车载供氢系统,通过实时监控供氢系统内外氢气压力、温度和浓度等关键参数,利用数据分析预测系统性能,实现故障预测和自我诊断,进而确保安全运行。

3) 车载供氢系统各部件逐渐向轻量化、高可靠性、低成本、标准化和模块化方向发展,通过通用设计和接口,简化生产,维修和替代也将更加便捷;复合材料储氢气瓶是高压气态储氢的发

展趋势，碳纤维全缠绕塑料内胆储氢气瓶是目前的重点攻关方向，塑料内胆材料及制备、碳纤维缠绕技术、试验评价技术等亟需开展；70 MPa及以上组合阀设计与制造、高度集成化技术、智能控制与感知技术是阀门部件亟需攻关方向。

参考文献

- [1] 张奥, 杨军, 吴桐, 等. 燃料电池车载氢气供给系统概述[J]. 船电技术, 2019, 39(9): 53-56.
ZHANG A, YANG J, WU T, et al. Application of hydrogen supply system for fuel cell vehicles[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2019, 39(9): 53-56.
- [2] 王伟, 曲辅凡, 梁荣亮. 现代燃料电池汽车NEXO技术分析[J]. 汽车零部件, 2020(7): 90-93.
WANG W, QU F F, LIANG R L. Analysis of NEXO technology of hyundai fuel cell vehicle[J]. Automobile Parts, 2020(7): 90-93.
- [3] MINORU M, TATSUYA F, KUNIAKI O. Powertrain system of Honda FCX Clarity fuel cell vehicle[J]. World Electric Vehicle Journal, 2009, 3(4): 820 - 829.
- [4] 冯健美, 韩济泉, 陈伟, 等. 一种燃料电池氢气循环系统及控制方法: CN111785993A[P]. 2020-10-16.
FENG J M, HAN J Q, CHEN W, et al. Fuel cell hydrogen circulation system and control method: CN111785993A[P]. 2020-10-16.
- [5] 李昌泉, 郝义国, 胡帅. 一种燃料电池阳极氢气循环系统及其控制方法: CN112563537A[P]. 2021-03-26.
LI C Q, HAO Y G, HU S, et al. A fuel cell anode hydrogen circulation system and its control method: CN112563537A[P]. 2021-03-26.
- [6] 苏赵琪, 李飞强, 陈勇刚. 一种燃料电池供氢系统以及车辆: CN218274662U[P]. 2023-01-10.
SU Z Q, LI F Q, CHEN Y G. A fuel cell hydrogen supply system and vehicle: CN218274662U[P]. 2023-01-10.
- [7] JAMES B D, SPISAK A B, COLELLA W G. Design for manufacturing and assembly cost estimate methodology for transportation fuel cell systems[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2014, 136(2): 024503.
- [8] 杨祖勇, 陈黎. 质子交换膜氢燃料电池供氢系统及控制方法: CN113130941A[P]. 2021-07-16.
YANG Z Y, CHEN L. Proton exchange membrane hydrogen fuel cell hydrogen supply system and control method: CN113130941A[P]. 2021-07-16.
- [9] 涂正凯, 刘洋, 赵俊杰, 等. 一种质子交换膜燃料电池双引射器循环系统: CN113629275B[P]. 2023-03-24.
TU Z K, LIU Y, ZHAO J J, et al. Proton exchange membrane fuel cell dual ejector circulation system: CN113629275B[P]. 2023-03-24.
- [10] 尹丛勃, 宋和国, 陈雷, 等. 双引射器系统、氢燃料电池双引射器模块系统、设计方法、新能源汽车: CN114352582A[P]. 2022-04-15.
YIN C B, SONG H G, CHEN L, et al. Dual ejector system, hydrogen fuel cell dual ejector module system, design method, new energy vehicle: CN114352582A[P]. 2022-04-15.
- [11] 张毅. 丰田FCHV-4型燃料电池汽车的结构特性分析[J]. 中国科技信息, 2011(16): 104-105.
ZHANG Y. Structural characteristics analysis of Toyota FCHV-4 fuel cell vehicle[J]. China Science and Technology Information, 2011(16): 104-105.
- [12] KOJIMA K, KAZUHIRO F. Current status and future outlook of fuel cell vehicle development in toyota[J]. ECS Transactions, 2015, 69(17): 213-219.
- [13] HWANG J J, WANG D Y, SHIH N C. Development of a lightweight fuel cell vehicle[J]. Journal of Power Sources, 2005, 141(1): 108-115.
- [14] 许德超, 赵洪辉, 盛夏, 等. 燃料电池湿度控制方法及装置: CN116598544A[P]. 2023-08-15.
XU D C, ZHAO H G, SHENG X, et al. Fuel cell humidity control method and device: CN116598544A[P]. 2023-08-15.
- [15] 邢子义, 王升科, 邢晓明. 一种氢气循环泵与引射器串联集成的燃料电池供氢系统: CN112864419B[P]. 2021-11-09.
XING Z Y, WANG S K, XING X M. Fuel cell hydrogen supply system with hydrogen circulation pump and ejector integrated in series: CN112864419B[P]. 2021-11-09.
- [16] 李勇, 邓佳, 韦庆省, 等. 一种燃料电池供氢系统及其应用的燃料电池系统: CN210224185U[P]. 2020-03-31.
LI Y, DENG J, WEI Q S, et al. Fuel cell hydrogen supply system and fuel cell system using same: CN210224185U[P]. 2020-03-31.
- [17] JAMES, B D, KALINOSKI J A, BAUM K N, et al. Mass production cost estimation for direct H₂ PEM fuel cell system for automotive applications 2009 update[R]. New York: Office of Scientific and Technical Information(OSTI), 2010.

- [18] TANAKA S, NAGUMO K, YAMAMOTO M, et al. Fuel cell system for Honda Clarity fuel cell[J]. eTransportation, 2020, 3: 100046.
- [19] 任树兴, 周百慧, 方川, 等. 燃料电池多功能氢喷及燃料电池系统、车辆: CN114759220A[P]. 2022-07-15.
- REN S X, ZHOU B H, FANG C, et al. Fuel cell multifunctional hydrogen injection and fuel cell system, vehicle: CN114759220A[P]. 2022-07-15.
- [20] 马明辉, 郝冬, 郭帅帅, 等. 燃料电池发动机氢气供给系统技术分析[J]. 汽车零部件, 2021(5): 95-98.
- MA M H, HAO D, GUO S S, et al. Analysis on anode hydrogen supply system of fuel cell engine[J]. Automobile Parts, 2021(5): 95-98.
- [21] 南泽群, 许思传, 章道彪, 等. 车用 PEMFC 系统氢气供应系统发展现状及展望[J]. 电源技术, 2016, 40(8): 1726-1730.
- NAN Z Q, XU S C, ZHANG D B, et al. Development and prospect of hydrogen supply system in vehicle PEMFC[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(8): 1726-1730.
- [22] UNO M, SHIMADA T, TANAKA K. Reactant recirculation system utilizing pressure swing for proton exchange membrane fuel cell[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(5): 2558-2566.
- [23] AHLUWALIA R K, WANG X. Fuel cell systems for transportation: status and trends[J]. Journal of Power Sources, 2008, 177(1): 167-176.
- [24] CHEN J, SIEGEL J B, STEFANOPOULOU A G, et al. Optimization of purge cycle for dead-ended anode fuel cell operation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(12): 5092-5105.
- [25] HIKITA S, NAKATANI F, YAMANE K, et al. Power-generation characteristics of hydrogen fuel cell with dead-end system[J]. JSAE Review, 2002, 23(2): 177-182.
- [26] DUMERCY L, PÉRA M C, GLISES R, et al. PEFC stack operating in anodic dead end mode[J]. Fuel Cells, 2004, 4(4): 352-357.
- [27] MOÇOTÉGUY P, DRUART F, BULTEL Y, et al. Monodimensional modeling and experimental study of the dynamic behavior of proton exchange membrane fuel cell stack operating in dead-end mode[J]. Journal of Power Sources, 2007, 167(2): 349-357.
- [28] Siegel J B, McKay D A, Stefanopoulou A G, et al. Measurement of liquid water accumulation in a PEMFC with dead-end anode[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2008, 155(11): 1168-1178.
- [29] CHOI J W, HWANG Y-S, CHA S W, et al. Experimental study on enhancing the fuel efficiency of an anodic dead-end mode polymer electrolyte membrane fuel cell by oscillating the hydrogen[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(22): 12469-12479.
- [30] 崔明月, 朱小平, 薛科, 等. 氢燃料电池车储氢技术及其发展现状[J]. 汽车实用技术, 2022, 47(10): 173-178.
- CUI M Y, ZHU X P, XUE K, et al. Hydrogen storage technology of hydrogen fuel cell vehicle and its development status[J]. Automobile Applied Technology, 2022, 47(10): 173-178.
- [31] 曹冬惠, 杜冬梅, 何青. 氢储能安全及其检测技术综述[J]. 发电技术, 2023, 44(4): 431-442.
- CAO D H, DU D M, HE Q. Summary of hydrogen energy storage safety and its detection technology[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(4): 431-442.
- [32] 陈虹港. 70 MPa 复合材料氢气瓶液压疲劳试验装置及压力和温度控制方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- CHEN H G. Research on hydraulic fatigue test device and pressure and temperature control method of 70 MPa composite hydrogen bottle[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [33] 何广利, 杨康, 董文平, 等. 基于国产三型瓶的氢气加注技术开发[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(3): 696-701.
- HE G L, YANG K, DONG W P, et al. Filling technology development for Type III hydrogen tank[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(3): 696-701.
- [34] 苏红艳, 何春辉, 金碧辉, 等. 70 MPa 车载 IV 型储氢气瓶关键技术及标准化研究[J]. 中国特种设备安全, 2023, 39(5): 1-8.
- SU H Y, HE C H, JIN B H, et al. Research on key technology and standardization of 70 MPa on-board type IV hydrogen storage cylinder[J]. China Special Equipment Safety, 2023, 39(5): 1-8.
- [35] 曹宽, 李江川, 鲁文皓, 等. 一种燃料电池车辆及其加氢口故障检测方法及其系统: CN115723634A[P]. 2023-03-03.
- CAO K, LI J C, LU W H, et al. A fault detection method and system for fuel cell vehicles and their hydrogenation outlets: CN115723634A[P]. 2023-03-03.
- [36] 唐潘宇, 吴方权, 马明, 等. 一种氢能加注用加注

- 口: CN115489300A[P]. 2022-12-20.
- TANG P Y, WU F Q, MA M, et al. A filling port for hydrogen energy filling: CN115489300A[P]. 2022-12-20.
- [37] 刘仁豪, 孙维福, 孟令宇. 加氢口和车辆: CN117662987A[P]. 2024-03-08.
- LIU R H, SUN W F, MENG L Y. Hydrogen inlet and vehicle: CN117662987A[P]. 2024-03-08.
- [38] 刘扬, 刘汇源. 高压储氢气瓶组合阀的研制[J]. 通用机械, 2008, 6(9): 93-95.
- LIU Y, LIU H Y. The research and development of combination valves for high-pressure hydrogen cylinder [J]. General Machinery, 2008, 6(9): 93-95.
- [39] YAMASHITA A, KONDO M, GOTO S, et al. Development of high-pressure hydrogen storage system for the toyota "Mirai" [C]/SAE 2015 World Congress & Exhibition. Detroit, Michigan, USA: SAE, 2015: 1169-1176.
- [40] HAUSMANN P. Tankvalve: US 10948087B2[P]. 2021-03-16.
- [41] 何春辉, 邹宏伟, 苏红艳. 70 MPa 车载瓶口阀的研究与优化[J]. 中国特种设备安全, 2022, 38(9): 35-40.
- HE C H, ZOU H W, SU H Y. Research and optimization of 70 MPa on-board tank valve[J]. China Special Equipment Safety, 2022, 38(9): 35-40.
- [42] 何春辉, 赵亚丽, 陈甲楠, 等. 一种氢气瓶口组合阀: CN110726071A[P]. 2020-01-24.
- HE C H, ZHAO Y L, CHEN J N, et al. Hydrogen bottleneck combination valve: CN110726071A[P]. 2020-01-24.
- [43] 国宁, 刘伟, 杨淮文, 等. 车载氢能瓶口阀振动建模与模态试验研究[J]. 液压气动与密封, 2023, 43(10): 73-77.
- GUO N, LIU W, YANG H W, et al. Study on vibration modeling and modal test of on-board hydrogen energy cylinder valve[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2023, 43(10): 73-77.
- [44] 王冰, 侍崇诗, 黄明宇, 等. 燃料电池供氢系统的研究进展[J]. 现代化工, 2018, 38(1): 35-39.
- WANG B, SHI C S, HUANG M Y, et al. Research progress of hydrogen supply system in fuel cells[J]. Modern Chemical Industry, 2018, 38(1): 35-39.
- [45] 焦杰, 张幽彤, 孙立清, 等. 燃料电池供氢组合阀仿真与拓扑优化研究[J]. 现代化工, 2018, 38(11): 221-225.
- JIAO J, ZHANG Y T, SUN L Q, et al. Simulation and topology optimization for hydrogen supply combination valves in fuel cell[J]. Modern Chemical Industry, 2018, 38(11): 221-225.
- [46] 张志新, 王春鹏, 郑水英, 等. 燃料电池汽车高压供氢组合阀研究综述[J]. 装备制造技术, 2019(11): 1-6.
- ZHANG Z X, WANG C P, ZHENG S Y, et al. Review of high pressure hydrogen supply combined valves for fuel cell[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2019(11): 1-6.
- [47] 任圣哲, 张明俊, 刘焕萍, 等. 一种车载氢系统多功能组合阀: CN213026210U[P]. 2021-04-20.
- REN S Z, ZHANG M J, LIU H P, et al. Multifunctional combination valve of vehicle-mounted hydrogen system: CN213026210U[P]. 2021-04-20.
- [48] 钱锦远, 于龙杰, 盛侃, 等. 一种具有流量调节与稳压功能的供氢组合阀: CN114688324A[P]. 2022-07-01.
- QIAN J Y, YU L J, SHENG K, et al. Hydrogen supply combination valve with flow regulation and pressure stabilization functions: CN114688324A[P]. 2022-07-01.
- [49] 侯松峰, 王献岭, 史新芳. 减压阀低温密封性能优化研究[J]. 河南科技, 2022(21): 40-44.
- HOU S F, WANG X L, SHI X F. Study on optimization of low temperature sealing performance of pressure reducing valve[J]. Henan Science and Technology, 2022(21): 40-44.
- [50] CHEN F Q, ZHANG M, QIAN J Y, et al. Pressure analysis on two-step high pressure reducing system for hydrogen fuel cell electric vehicle[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(16): 11541-11552.
- [51] LI B, LIU Y, LI J, et al. Investigation of a novel hydrogen depressurization structure constituted by an orifice plate with Tesla-type channels[J]. Materials, 2022, 15(14): 4918.
- [52] CHEN F Q, JIN Z J, Effects of perforated plate on hydrogen flow in L-shaped high pressure reducing valve[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(5): 1956-1967.
- [53] 王剑, 王浩, 王庆, 等. 减压阀性能试验与影响阀门可靠性因素分析[J]. 阀门, 2024(2): 204-209.
- WANG J, WANG H, WANG Q, et al. Performance test of pressure reducing valve and analysis of influencing factors on valve reliability[J]. Valve, 2024(2): 204-209.
- [54] 张一建, 张清峰. 一种安全稳定的过流阀: CN219994486U[P]. 2023-11-10.

- ZHANG Y J, ZHANG Q F. Safe and stable overflow valve: CN219994486U[P]. 2023-11-10.
- [55] 赵益春, 马静. 过流阀介质升力特性和弹簧刚度分析[J]. 石油化工设备, 2015, 44(5): 44-48.
- ZHAO Y C, MA J. Analysis of excess flow valve liquid lift characteristic and spring rate[J]. Petro-Chemical Equipment, 2015, 44(5): 44-48.
- [56] 史娜飞. 弹簧式大口径过流阀设计[J]. 阀门, 2016, 8(3): 7-8.
- SHI N F. Design of spring type large diameter overflow valve[J]. Valve, 2016, 8(3): 7-8.
- [57] 李鹏, 张兆东. 关于带过流阀的紧急切断阀改进探讨[J]. 化工装备技术, 2021, 42(5): 46-48.
- LI P, ZHANG Z D. Discussion on improvement of emergency shut-off valve with overflow valve[J]. Chemical Equipment Technology, 2021, 42(5): 46-48.
- [58] SHI B, WANG F, WANG H Q, et al. Research on the planetary gear deceleration machine design of a novel rapidly-opening/closing actuator of manual valve[J]. Advanced Engineering Forum, 2011, 21(2): 519-522.
- [59] 程强, 吴志军, 钱勇, 等. 手动换向阀的研究和设计[J]. 阀门, 2022, 14(4): 291-293.
- CHENG Q, WU Z J, QIAN Y, et al. Research and design of manual directional valves [J]. Valve, 2022, 14(4): 291-293.
- [60] 王浩, 王剑, 刘成林, 等. 高压手动截止阀设计计算及分析[J]. 阀门, 2024(1): 8-12.
- WANG H, WANG J, LIU C L, et al. High pressure manual shut-off valve design calculation and analysis[J]. Valve, 2024(1): 8-12.
-
- 收稿日期: 2023-12-25.
修回日期: 2024-03-28.
作者简介:
- 
- 张杰
- 张杰(1987), 男, 博士, 教授, 主要从事清洁能源安全高效利用技术与装备、管道与压力容器服役安全等研究工作, Longmenshao@163.com;
- 
- 宋科
- 宋科(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为车载供氢系统、氢能装备设计与制造, 2876967217@qq.com。
- (责任编辑 辛培裕)