

氢燃料电池阳极引射循环技术

王彦波¹, 孙玉玲^{2*}, 冯刚², 时保帆², 唐亮², 王丹博²

1. 潍柴新能源动力科技有限公司, 山东 潍坊 261061;

2. 山东国创燃料电池技术创新中心有限公司, 山东 潍坊 261061

摘要:为提高氢燃料电池引射器性能,系统分析引射器结构与工作原理,根据气体相态、喷嘴结构、喷嘴数、分布级数和引射流体混合特征等详述引射器的分类及特点,在此基础上对引射器未来发展方向进行预测。分析结果表明:采用多级引射器、多喷嘴引射器、旋流引射器、可变几何引射器等新结构和新技术,并通过优化引射器的智能控制策略等方法可解决引射器变工况适应性差的问题;引射器设计开发过程中,应基于实际气体组分和工况参数进行数值计算和结构设计,减少水蒸气凝结,保证引射器的引射性能;随着节能环保需求的提高和新兴技术的发展,引射器研究呈现液体力学、材料科学与智能控制等多学科交叉融合的趋势。

关键词:燃料电池;引射器;现状

中图分类号: TM911.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-6397(2025)03-0056-08

引用格式: 王彦波,孙玉玲,冯刚,等. 氢燃料电池阳极引射循环技术[J]. 内燃机与动力装置,2025,42(3):56-63.

WANG Yanbo, SUN Yuling, FENG Gang, et al. Anode recirculation technology using ejector in hydrogen fuel cell [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025,42(3):56-63.

0 引言

随着全球经济的高速发展,能源安全问题已经成为制约各国可持续发展的关键因素。传统化石能源日趋枯竭,且其开发利用带来的环境污染问题日益严峻,难以满足未来各行业的发展需求。推动能源结构转型升级,寻找可替代清洁能源逐渐成为各国能源战略的核心议题^[1-2]。氢燃料电池是一种将氢气的化学能转化为电能的能量转换装置,具有结构简单、能量转化率高、噪声低且无污染等优点,受到了人们的青睐,被认为是最有发展前景的清洁能源之一,是传统能源的理想替代品^[3-4]。近年来,氢能作为新型能源,其战略价值在交通工具、移动式能源、航空航天等领域尤为突出。

质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cells, PEMFC)工作过程中,为了保证电池性能,提高阳极氢气的利用率^[5],通常需要向阳极提供过量氢气,氢气供给不足时,因反应物浓度降低而导致电池性能显著衰减。为了提高阳极氢气分布的均匀性^[6]、降低阳极和阴极之间的气体压力差、保护膜电极、消除安全隐患,现代 PEMFC 通常配置氢气循环系统回收电堆出口未反应的氢气。目前,氢气循环系统多采用氢气循环泵、引射器等装置实现氢气的高效循环和再利用^[7]。在实际使用过程中,氢气循环泵因其结构复杂、成本高且存在寄生功率及振动噪声问题逐渐被引射器所取代。Toghyani 等^[8]分析了引射器、电化学氢泵和机械压缩机 3 种阳极再循环装置对 PEMFC 电堆工作性能的影响,结果表明:在所有工作电流密度下,采用机械压缩机配置的集成系统效率最低;在低功率工况下,电化学氢泵与引射器循环系统效

收稿日期:2025-02-19

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFB2500504);泰山产业领军人才工程专项经费资助项目(YF24001JY-001)

第一作者简介:王彦波(1986—),男,山东临朐人,工学博士,正高级工程师,主要研究方向为新能源汽车,E-mail:wangyanb@weichai.com。

*通信作者简介:孙玉玲(1994—),女,黑龙江青冈人,工学硕士,工程师,主要研究方向为氢燃料电池性能开发,E-mail:sunyuling@weichai.com。

率接近;在大功率工况下,基于引射器阳极气体再循环装置的电堆效率最高。Liu 等^[9]阐述了 PEMFC 氢气再循环装置引射器的设计和几何参数优化方法,分析了引射器对电堆性能的影响,探讨了扩大引射器工作范围和改进燃料输送系统控制策略的方法。

本文中分析引射器结构、工作原理、分类及特点、发展现状,在此基础上对引射器未来发展方向进行预测,为提高配备引射器的 PEMFC 的效率、寿命、经济性提供参考。

1 引射器结构与工作原理

引射器是一种利用系统内部压差实现气体循环的机械装置,其结构简单、噪声低、易保养,可实现零寄生功率消耗下阳极氢气的增压回收^[10]。

引射器主要由一次流进气管、二次流进气管、喷嘴、抽吸室、混合室和扩散室等部分构成,引射器结构示意图及工作原理如图 1 所示。引射器工作时,根据流体压力可分为一次流(高压)和二次流(低压)。在氢燃料电池工作过程中,阳极一般采用压力为 20~45 MPa 的储氢罐(最大可达 70 MPa)进行供气^[11],因此,引射器的一次流为经减压和流量控制的纯氢气,二次流为电堆阳极腔未反应的残余氢气。

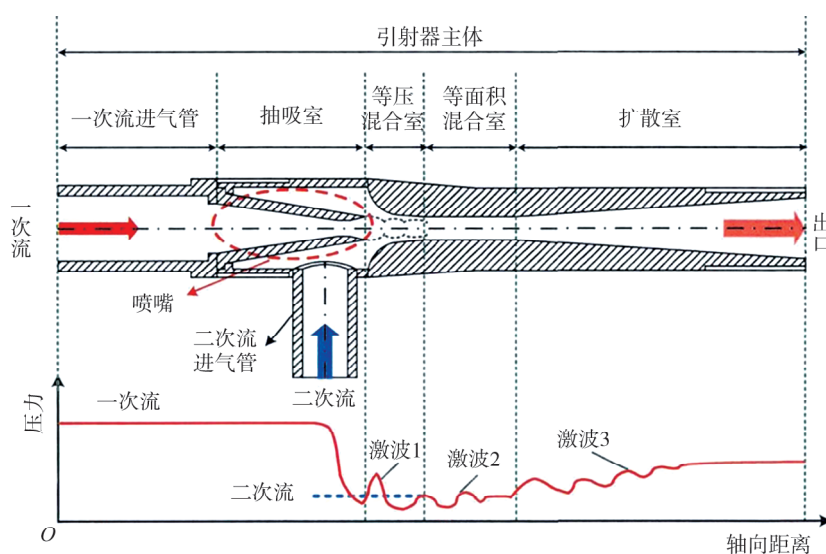


图1 引射器结构示意图及工作原理

根据伯努利原理,等高流动时流体流速与压强呈此消彼长的关系,高压氢气(一次流)经喷嘴加速后,形成高速低压的超声速气流进入混合室,在混合室内产生激波并在喷嘴出口处形成低压区,二次流体在入口压力与低压区的压差作用下被抽吸进抽吸室。两股气流在混合室内通过分子运动进行能量交换与混合,混合过程中一次流将动能传递给二次流,在混合室内两股气流混合均匀后进入扩散室。混合气流在渐扩型扩散室内压力上升、速度下降,将动能转化为静压能,最终达到燃料电池工作所需的压力。在实际工作过程中,引射器内部流体运动十分复杂^[12],整个引射过程中,引射器对二次流进行抽吸和升压,实现阳极出口剩余氢气的循环再利用,提高氢气利用率,降低系统能耗,已成为现代氢燃料电池的关键部件。

2 燃料电池引射器分类

按照不同的分类标准可将引射器分为多种类型:1)根据引射流体介质,可分为同相引射器、异相引射器、相变引射器;2)按照喷嘴结构,可分为渐缩式引射器与缩放式引射器;3)按照系统中所用引射器数量,可分为单级数引射器与多级数引射器;4)按照喷嘴数量,可分为单喷嘴引射器与多喷嘴引射器;5)按

照引射流体混合特征,可分为等压混合引射器与等截面混合引射器^[13]。

2.1 不同流体介质引射器

根据进入引射器的一次流和二次流的介质,可分为同相引射器(气-气、液-液)、异相引射器(一次流为气体,二次流为液体或固体)、相变引射器(引射流体发生蒸发、冷凝等相变)。因气态流体更易形成高压高速状态,在引射器工作过程中通常将气态物质作为一次流,应用在燃料电池系统中的引射器一般为同相引射器^[14]。

根据一次流介质,引射器可细分为燃气引射器、蒸汽引射器、空气引射器^[15]。在引射器内部结构相同的情况下,高温燃气引射器的引射效果最优,其次为蒸汽引射器,最后为空气引射器。引射器一次流介质温度越高,引射器的引射能力越强,但高温高压的一次流介质对引射器的加工工艺和材料都提出更严格的要求。

2.2 渐缩式与渐缩渐扩式引射器

高压一次流体经过喷嘴,随着通道截面缩小,流体压力逐渐降低而速度增加。根据对引射器工作流体喷出速度的要求,引射器喷嘴可设计为渐缩渐扩式和渐缩式两种形式^[16]。渐缩渐扩式和渐缩式引射器结构示意图如图 2 所示。渐缩渐扩式结构有助于工作流体在喷嘴内加速,渐扩喷嘴口处工作流体可达到超音速,因此,渐缩渐扩式引射器又称超音速引射器。由于结构限制,在渐缩喷嘴内工作流体通常保持亚音速流动,因此,渐缩式引射器又称亚音速引射器。当流体在喷嘴口处背压(环境压力)低于临界压力时,流体继续膨胀,速度进一步增大,最终可能达到音速或超音速。

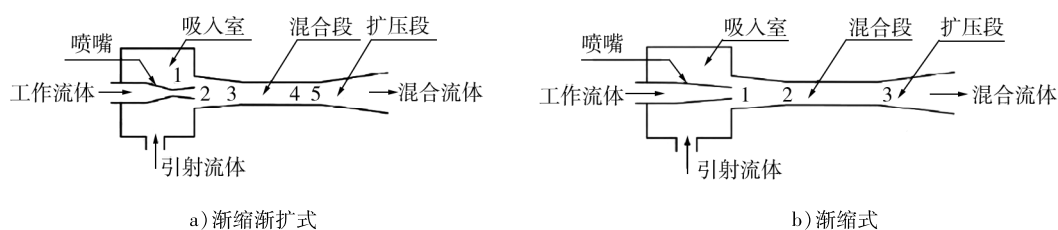


图 2 渐缩渐扩式和渐缩式引射器结构示意图

在 PEMFC 工作过程中,阳极出口含有大量湿热的水蒸气。在超音速与亚音速下,水蒸气流动特征差异较大,尤其是超音速下产生的压缩波或膨胀波显著影响流场分布。当流体达到超音速时,其内部快速发生气-液两相间的质量与能量交换,并伴随明显的激波效应。为优化系统循环效率,工程上常采用渐缩式引射器实现 PEMFC 内剩余氢气的循环利用和多余水蒸气的排出,这是由于渐缩结构能有效抑制湿热二次流与减压一次流混合时产生的水蒸气冷凝现象,还能降低因流动不稳定导致的物理磨损和噪声,提高系统的稳定性和可靠性^[17]。

2.3 单级与多级引射器

在 PEMFC 系统中,单一引射器结构往往难以满足全工况范围内的氢气供给需求。为解决这一问题,可采用双引射器串、并联的配置方案,实现在不同负载条件下氢气的稳定供应。单级、双级气体引射器示意图如图 3 所示。

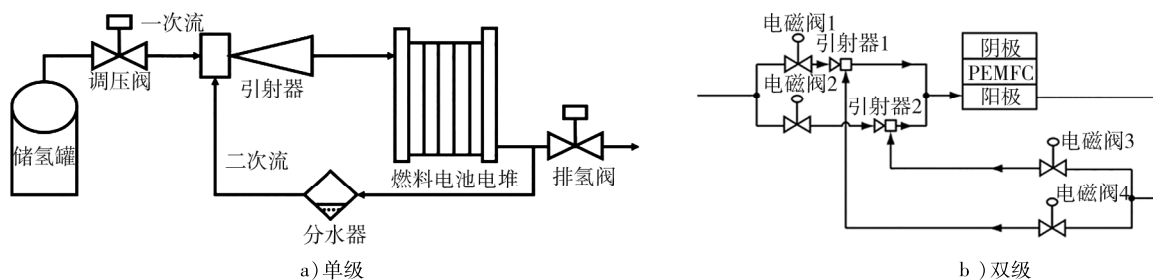


图 3 单级、双级气体引射器示意图

2010年,美国某公司提出了双引射器系统方案^[18],该方案采用高、低压引射器协同工作,根据电堆功率需求,在高、低负荷工况下自动切换喉口,通过调节喉口有效截流面积,精确控制工作流体的喷射流量和流速,进而优化氢气循环流量,有效满足燃料电池在不同输出功率下的循环需求。

周苏等^[19]采用索科洛夫方法建立计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)模型,针对PEMFC低、中、高负荷3种工况设计引射器结构,基于80 kW燃料电池大客车实际运行工况,仿真分析了氢循环引射器的工作效率,研究发现:采用单级引射器独立工作的供氢循环系统无法覆盖燃料电池全部工况的工作要求;在此基础上提出采用双引射器并联的供氢方案,仿真结果表明,双级引射器可满足燃料电池全负载的工作要求,具有较好的引射特性。

Kim等^[20]针对潜艇用PEMFC系统,提出了一种基于加湿氢气的阳极再循环双亚音速引射器并联设计方案,在目标系统全工况范围内达到了预期引射比,提高了组件的灵敏度,降低了产品成本。杨祖勇等^[21]采用双引射器及各部件集成化设计方案实现对氢气循环利用。尹丛勃等^[22]提出一种高功率引射器与低功率引射器并联的设计方案,可满足燃料电池汽车全功率范围要求。

2.4 单喷嘴与多喷嘴引射器

根据喷嘴数,引射器可分为单喷嘴引射器与多喷嘴引射器。单喷嘴引射器根据喷嘴口形状分为中心和环形喷嘴引射器,如图4所示。多喷嘴引射器可分为双喷嘴、三喷嘴、四喷嘴引射器等,如图5所示。

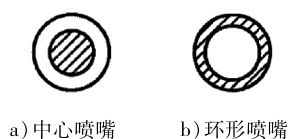


图4 单喷嘴引射器



图5 多喷嘴引射器

引射器工作效率影响燃料电池系统的整体性能。在实际运行过程中,引射器的工况参数应随燃料电池输出功率的变化而动态调整。然而,传统固定结构的引射器因其几何参数不可调节,难以在整个功率输出范围内维持最佳性能。特别是在实际运行工况与设计工况偏离较大时,引射器的循环性能会出现显著衰减。为解决这一技术难题,提高引射器对燃料电池功率波动的适应能力,研究人员开发了多喷嘴引射器。

Song等^[23]设计了将2个渐缩喷嘴以对称布局方式集成在吸入室中的双喷嘴引射器,采用仿真与试验相结合的方法分析了其引射性能,结果表明:与传统单喷嘴引射器相比,对称式双喷嘴引射器在燃料电池系统功率输出较大且一次流氢气压力较低的工况下更具性能优势。Du等^[24]设计了如图6所示的同轴双喷嘴引射器,该设计根据工作流体压力分配两个喷嘴的面积,采用仿真与试验相结合的方法对该同轴双喷嘴引射器性能进行了分析,结果表明:低功率时,引射器回流比大于2,并且可满足电池17.9~84.0 kW的宽功率工作要求。

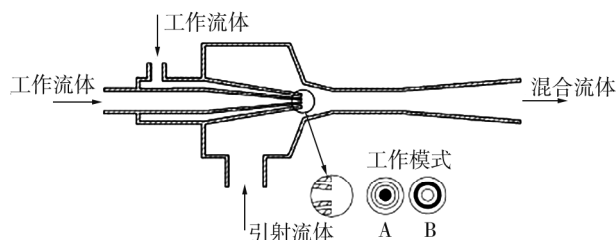


图6 同轴双喷嘴引射器

2.5 等压混合与等面积混合引射器

根据一次流和二次流的混合位置,引射器可分为等压混合和等面积混合2种^[25-27],2种引射器结构示意图如图7所示。由图7可知:等压混合引射器的喷嘴出口在等压混合室内,一次流体和二次流体在等压混合室内混合;等面积混合引射器的喷嘴出口位于等面积混合室。等面积混合引射器的混合室通常为圆柱段,等压混合引射器的混合室包括圆柱段和收缩段。

等压混合引射器的引射比较高,通过调节喷嘴参数适应全工况工作要求,确保压力稳定以保护质子交换膜,因此常应用于燃料电池领域。廖达雄^[28]开展了等压双级多喷嘴引射器和增强混合喷嘴的研究,并进行试验验证,结果表明:等压混合引射器的引射性能高于常规的等面积混合引射器;选取合适的引射器工作参数可以优化引射器的性能;开缝喷嘴和花瓣喷嘴能有效增强主、被动气流的混合效果,加快混合

过程,提高混合室出口截面总压分布均匀性,缩短引射器的混合室长度,研究结果可为高增压比引射器设计和引射器尺寸控制设计提供参考。

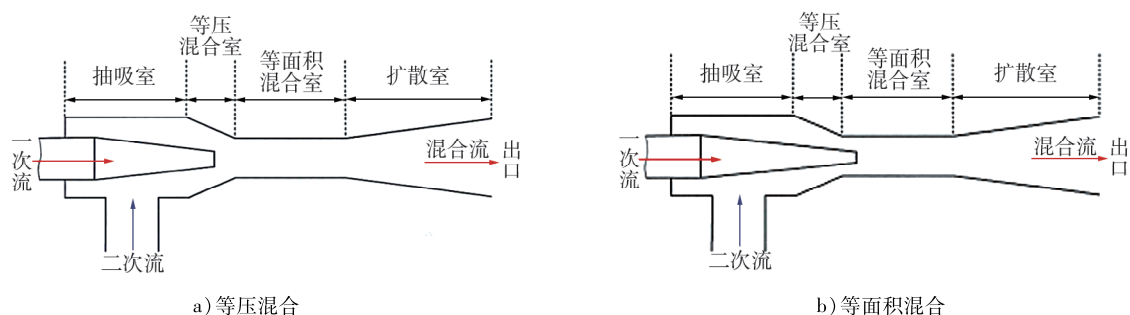


图 7 等压混合与等面积混合引射器

3 引射器研究现状

引射器系统在工业领域的研究与应用已历经百年发展历程,广泛应用在节能减排、移动发电、航天实验及化学激光器等领域。由于不同应用场景对引射器的需求不同,其结构和性能也存在一定差异。

3.1 机理研究

引射器机理研究聚焦于激波/膨胀波结构、混合层湍流特性、能量传递效率等关键问题。引射器性能受工作流体性质、几何参数(喷嘴直径、混合室长度等)和工况(压力、温度)共同影响。

早期,Keenan 等^[29]基于理想气体假设,最早提出了适用于空气介质的引射器。1950 年代,研究人员在试验的基础上基于理想空气动力学理论建立了引射器一维计算理论模型,标志着引射器研究从经验设计方法转向理论建模,为现代引射器在能源、航天等领域的精细化设计提供了初始量化工具。张文辉等^[30]采用 RNG $k-\varepsilon$ 涡黏模型对某天然气引射器进行仿真,分别计算了引射器内部的黏性熵产、湍流熵产、有限温差传热熵产以及壁面熵产,发现引射器的湍流熵产与其内部钻石激波、斜激波以及流体间的剪切扩散过程密切相关。Nikiforow 等^[31]建立了 3 种车用 PEMFC 引射器湍流模型,采用流体动力学模拟二维流场对引射器性能进行仿真,发现引射器的工作范围与系统流阻呈一定的线性关系,流阻越小,引射器工作范围越宽。

索科洛夫设计法广泛应用于引射器结构建模,结合流体动力学分析优化入口与出口参数,实现氢循环效率提升。张迪博等^[32]、赵海贺等^[33]采用索科洛夫设计法对引射器进行结构设计,确定需要优化的参数,开展了引射流体的流场分析,并对引射器进行优化。

3.2 结构优化设计

在固体氧化物燃料电池系统中,引射器已得到成功应用,但在车用 PEMFC 领域,传统的引射结构无法满足其宽功率范围的工作要求,尤其是低功率工况下的性能较差。许多学者对这一问题进行研究,发现优化引射器的关键结构参数可以增大引射器在 PEMFC 中的工作范围。

庞子卉等^[34]建立引射器 CFD 仿真模型,研究等容混合室直径 D_m 和喷嘴出口直径 D_1 等参数对引射器性能的影响,结果表明: $D_m/D_1 = 2.5 \sim 3.0$ 时,引射器的工作功率可达 40~170 kW,引射性能较好。Pei 等^[35]建立了 PEMFC 引射器 CFD 模型,分析了关键几何尺寸对引射器性能的影响,结果表明:通过优化主喷嘴直径、混合管直径、混合管长度及主喷嘴出口位置等关键几何参数,有效提高了引射性能并扩展了引射器工作范围。

3.3 仿真方法的应用

CFD 模拟成为主流工具,Fluent、MATLAB 等软件应用广泛,神经网络算法等新优化技术的应用正在兴起。许思传等^[36]基于 MATLAB 构建了 PEMFC 引射器三维模型,分析引射器性能并进行了试验验证。张亦嫣^[37]提出一种基于 GA-BP 神经网络的两相引射器神经网络计算模型,准确快速地预测了引射器在

不同工况和结构参数下的性能,并采用非支配排序遗传算法对两相引射器的性能进行了综合优化,全面提高了引射器的引射比。

3.4 新结构

许多学者通过多级引射器组合提高引射器的工作范围。Hwang^[38]针对 PEMFC 研发出一种连续流和脉冲流相结合的氢气再循环方式,大功率工况采用连续流模式、小功率工况采用脉冲流模式,瞬态测试结果表明:该氢气回收方案可提高引射器的引射比,并可以适应宽范围功率需求。刘宗政等^[39]为提高多级等压混合引射器性能,通过数学分析和试验,研究多级等压混合引射器级数的确定原则,对影响多级等压混合引射器性能的参数进行了匹配和优化,得到理想的引射器增压比和引射效率。

旋流引射器是一种在传统引射器基础上结合旋流技术的新结构,通过引入旋流场抑制激波损失,增强混合效率或实现特殊流动控制。目前关于旋流引射器的研究较少。赵佳乐等^[40]采用数值模拟方法探究螺旋叶片结构参数对旋流引射器内部流场的影响规律,研究显示:在给定的工况参数下,改变螺旋叶片的结构参数对引射系数的影响不大,改变高压入口压力对引射性能影响较大。

多喷嘴引射器在部分工业装备(如喷射泵、真空系统)中已有应用,但受限于加工成本和复杂性,普及度较低。近年来,随着 CFD 等仿真技术的进步,多喷嘴引射器在燃料电池领域出现创新型应用。王子源^[41]设计了一种多喷嘴结构,建立了多喷嘴结构引射器三维模型,仿真研究了工作流体压力与引射器出口压力对多喷嘴氢气引射器工作效率的影响,发现多喷嘴氢气引射器在双开模式下可以在相对宽广的引射器出口压力范围内保持稳定的工作效率。程友良等^[42]提出一种新型二段式喷嘴氢气引射器,建立三维 CFD 模型研究了喷嘴结构参数和混合室直径对氢气利用率的影响,发现采用新型引射器可使系统氢气利用率达到 93.5%。

4 技术展望

1)传统结构的引射器在变载工况下易出现引射比降低(回流不足)或压力振荡等问题,无法满足 PEMFC 宽功率工作范围要求。为解决上述问题,传统措施是通过优化引射器的结构参数拓宽引射器工作范围。未来发展方向为:①采用多级引射器、多喷嘴引射器、旋流引射器、可变几何引射器、激波控制技术等新结构和新技术,但可变几何结构的耐久性需要验证;②采用引射器-辅助设备混合系统(如引射器-小型循环泵);③优化引射器的智能控制策略。

2)车用燃料电池阳极出口多余氢气中含有大量水蒸气,对引射器性能影响很大。在 PEMFC 系统引射器的开发设计过程中,必须充分考虑实际气体组分(如氢气纯度、水蒸气含量)和工况条件(温度、压力、流量等参数)进行精确计算和优化设计。通过建立多物理场耦合模型,准确预测不同工况下水蒸气的相变行为,从而在设计阶段就避免水蒸气凝结现象的发生。

引射器研究正从传统经验设计向高精度预测、智能化控制方向发展,未来在碳中和、深空探测等战略领域潜力巨大。跨学科合作(流体力学、材料科学、人工智能)将是突破引射器性能瓶颈的关键,PEMFC 引射器技术正从固定结构向智能化、自适应方向发展。未来随着材料、制造和控制技术的进步,引射器有望成为 PEMFC 氢气循环的主流解决方案。

5 结束语

分析了引射器结构与工作原理,根据气体相态、喷嘴结构、喷嘴数量、分布级数和引射流体混合特征等详述引射器的分类及特点,在此基础上对引射器未来发展方向进行预测。引射器在变载工况下无法满足 PEMFC 宽功率工作范围要求仍是需要继续解决的问题;在引射器设计开发过程中,应考虑水蒸气的影响,按照实际气体组分和工况条件进行计算和优化设计,避免水蒸气出现凝结,保证引射效果。未来引射器有望成为 PEMFC 氢气循环的主流解决方案。

参考文献:

- [1] 赵冬冬,赵国胜,夏磊,等. 无人机用燃料电池阴极供气系统建模与控制[J]. 航空学报,2021,42(7):503-519.
- [2] 雷涛,闵志豪,付红杰,等. 燃料电池无人机混合电源动态平衡能量管理策略[J]. 航空学报,2020,41(12):293-307.
- [3] MITRA U, ARYA A, GUPTA S. A comprehensive and comparative review on parameter estimation methods for modelling proton exchange membrane fuel cell[J]. Fuel,2023,335:127080.
- [4] DENG Q H, MENG K, CHEN W S, et al. Study on the heat and mass transfer mechanisms of liquid-cooled PEMFC stacks based on non-isothermal model[J]. Energy Conversion and Management,2024,313:118628.
- [5] ZHANG Q G, TONG Z M, TONG S G. Effect of cathode recirculation on high potential limitation and self-humidification of hydrogen fuel cell system[J]. Journal of Power Sources,2020,468:228388.
- [6] 卢义康,王旭辉,许思传. 120 kW 级燃料电池可变喉口引射器的设计及特性[J]. 同济大学学报(自然科学版),2023,51(10):1625-1632.
- [7] FENG J M, ZHANG Q Q, HOU T F, et al. Dynamics characteristics analysis of the oil-free scroll hydrogen recirculating pump based on multibody dynamics simulation[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2021,46(7):5699-5713.
- [8] TOGHYANI S, BANIASADI E, AFSHARI E. Performance analysis and comparative study of an anodic recirculation system based on electrochemical pump in proton exchange membrane fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2018,43(42):19691-19703.
- [9] LIU Y, TU Z K, CHAN S H. Applications of ejectors in proton exchange membrane fuel cells: a review[J]. Fuel Processing Technology,2021,214:106683.
- [10] 朱立志. 结构和操作参数对气波引射器性能的影响[D]. 大连:大连理工大学,2013.
- [11] 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.
- [12] 徐海涛. FLUENT 在超音速蒸汽喷射真空泵中的应用[C]//2002 年 FLUENT 中国用户年会论文集. 北京:北京海基科技发展有限公司,2002:80-89.
- [13] 宋亚杰. 质子交换膜燃料电池阳极氢循环共焦双喷嘴引射器研制[D]. 济南:山东大学,2022.
- [14] 秦培禾. 文丘里引射器射流特性数值模拟及结构优化[D]. 唐山:华北理工大学,2022.
- [15] 吴继平. 高增压比多喷管超声速引射器设计理论、方法与实验研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2007.
- [16] CHEN J Y, JARALL S, HAVTUN H, et al. A review on versatile ejector applications in refrigeration systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2015,49:67-90.
- [17] 杨勇. 水蒸气超音速流动中的非平衡相变与激波效应[D]. 大连:大连理工大学,2010.
- [18] KIM J M, SOHN J Y, LEE Y W. Cathodic recirculation system using a dual-ejector to improve oxygen utilization of a submarine fuel cell[J]. Journal of the Korean Electrochemical Society,2010,13:193-197.
- [19] 周苏,胡哲,王凯凯,等. 质子交换膜燃料电池系统引射器的氢气循环特性[J]. 同济大学学报(自然科学版),2018,46(8):1115-1121.
- [20] KIM M, SOHN Y J, CHO C W, et al. Customized design for the ejector to recirculate a humidified hydrogen fuel in a submarine PEMFC[J]. Journal of Power Sources,2008,176(2):529-533.
- [21] 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]. 2021-11-22.
- [22] 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.
- [23] SONG Y J, WANG X L, WANG L, et al. A twin-nozzle ejector for hydrogen recirculation in wide power operation of polymer electrolyte membrane fuel cell system[J]. Applied Energy,2021,300:117442.
- [24] DU Z Q, LIU Q, WANG X L, et al. Performance investigation on a coaxial-nozzle ejector for PEMFC hydrogen recirculation system[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2021,46(76):38026-38039.
- [25] LITTLE A B, GARIMELLA S. A critical review linking ejector flow phenomena with component-and system-level performance[J]. International Journal of Refrigeration,2016,70:243-268.
- [26] BESAGNI G, MEREU R, INZOLI F. Ejector refrigeration; a comprehensive review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2016,53:373-407.
- [27] CHUNNANOND K, APHORN RATANA S. Ejectors: applications in refrigeration technology[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2004,8(2):129-155.

- [28] 廖达雄. 引射器性能优化和增强混合方法研究[D]. 西安:西北工业大学, 2003.
- [29] KEENAN J H, NEUMANN E P. A simple air ejector[J]. Journal of Applied Mechanics, 1942, 9(2): A75-A81.
- [30] 张文辉, 李奇. 天然气引射器内部熵产分析[J]. 过程工程学报, 2023, 23(6): 870-879.
- [31] NIKIFOROW K, KOSKI P, KARIMÄKI H, et al. Designing a hydrogen gas ejector for 5 kW stationary PEMFC system-CFD-modeling and experimental validation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(33): 14952-14970.
- [32] 张迪博, 施臻臻, 张文杰. 质子交换膜燃料电池引射器的优化设计[J]. 工程热物理学报, 2025, 46(1): 83-91.
- [33] 赵海贺, 陈泽宇, 覃承富, 等. 车用燃料电池氢气循环系统引射特性研究[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 173-179.
- [34] 庞子卉, 韩济泉, 陈平, 等. 170 kW 燃料电池系统引射器关键结构参数影响研究[J]. 汽车工程, 2022, 44(12): 1889-1895.
- [35] PEI P C, REN P, LI Y H, et al. Numerical studies on wide-operating-range ejector based on anodic pressure drop characteristics in proton exchange membrane fuel cell system[J]. Applied Energy, 2019, 235: 729-738.
- [36] 许思传, 韩文艳, 王桂, 等. 质子交换膜燃料电池引射器的设计及特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(1): 128-134.
- [37] 张亦嫣. 基于神经网络的 CO₂ 两相引射器性能预测及优化研究[D]. 太原:山西大学, 2024.
- [38] HWANG J J. Passive hydrogen recovery schemes using a vacuum ejector in a proton exchange membrane fuel cell system[J]. Journal of Power Sources, 2014, 247: 256-263.
- [39] 刘宗政, 郭隆德, 廖达雄, 等. 基于多级等压混合的引射器参数匹配与优化[J]. 空气动力学学报, 2012, 30(5): 573-577.
- [40] 赵佳乐, 任连城, 金鑫, 等. 气井中旋流式引射器性能影响因素研究[J]. 石油矿场机械, 2021, 50(1): 1-6.
- [41] 王子源. PEMFC 氢气引射器结构优化及宽功率多喷嘴设计研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2024.
- [42] 程友良, 张盼, 朱熔宇. 二段式喷嘴引射器结构参数对 PEMFC 系统氢气利用率的影响及优化研究[J]. 电气时代, 2023(增刊1): 86-94.

Anode recirculation technology using ejector in hydrogen fuel cell

WANG Yanbo¹, SUN Yuling^{2*}, FENG Gang², SHI Baofan², TANG Liang², WANG Danbo²

1. Weichai New Energy Power Technology Co., Ltd., Weifang 261061, China;

2. National Center of Technology Innovation for Fuel Cell, Weifang 261061, China

Abstract: To improve the performance of hydrogen fuel cell ejectors, the structure and working principle of ejector are systematically analyzed. The classification and characteristics of ejector are described based on gas phase state, nozzle structure, nozzle number, distribution level, and ejection fluid mixing characteristics. Based on this, the future development direction of ejectors is predicted. The analysis results indicate that new structures and technologies such as multi-stage ejector, multi nozzle ejectors, swirl ejectors, and variable geometry ejectors can be adopted, and the problem of poor adaptability to variable operating conditions of ejectors can be solved by optimizing the intelligent control strategy of ejectors. During the design and development process of the ejector, numerical calculations and structural design should be based on actual gas composition and operating parameters to reduce water vapor condensation and ensure the ejector's ejection performance. With the increasing demand for energy conservation and environmental protection and the development of emerging technologies, the research on ejector is showing a trend of interdisciplinary integration of fluid mechanics, materials science, and intelligent control.

Keywords: fuel cell; ejector; status

(责任编辑:臧发业)