

燃料电池氢气循环系统喷射器设计方法综述

戴征舒^{1,2}, 丁哲锐¹, 项佳欣¹, 刘畅¹, 张学军², 张华¹

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 浙江大学 制冷与低温研究所, 杭州 310027)

摘要: 氢能的合理利用, 是实现交通领域大规模深度脱碳的有效路径, 有助于推动我国实现“双碳”目标。在质子交换膜燃料电池系统中, 采用喷射器的氢气循环系统具有无运动部件、无需外部能耗、结构紧凑、运行可靠、无污染、成本低廉等优点。氢气喷射器作为系统的关键部件, 其性能将直接影响系统性能, 然而目前高效氢气喷射器的设计方法尚不完善, 本文对现有公开发表文献中氢气喷射器的设计方法进行了梳理和总结, 内容包括渐缩单喷嘴氢气喷射器设计、渐缩多喷嘴氢气喷射器设计和缩放喷嘴氢气喷射器设计。最后对氢气喷射器设计现状进行了总结, 并指出未来氢气喷射器设计改进方向。

关键词: 喷射器; 氢气循环; 质子交换膜燃料电池; 设计方法

中图分类号: TK 124 文献标志码: A

Review on design methods of ejectors used in the fuel cell hydrogen recirculation system

DAI Zhengshu^{1,2}, DING Zherui¹, XIANG Jiabin¹, LIU Chang¹, ZHANG Xuejun², ZHANG Hua¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The proper utilization of hydrogen energy is an effective way to achieve large-scale and deep decarbonization in the transportation sector, which helps realize China's "carbon peaking and carbon neutrality" goals. In proton exchange membrane fuel cell systems, the hydrogen recirculation system using ejectors has advantages such as no moving parts, no external energy consumption, compact structure, reliable operation, no pollution, and low cost, etc. The performance of the hydrogen ejector, as the key component of the system, directly affects the system performance. However, the design methods for efficient hydrogen ejectors were not yet perfect. This article reviewed and summarized the design methods of hydrogen ejectors in the existing published literature, including the design of single

收稿日期: 2023-09-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51906152); 上海市浦江人才计划(22PJ1411200); 浙江省领雁研发攻关计划项目(2024C03117)

通信作者: 戴征舒(1984-), 女, 副教授。研究方向: 燃料电池氢气循环系统喷射器研究。E-mail: zsdai-hvacr@163.com

引文格式: 戴征舒, 丁哲锐, 项佳欣, 等. 燃料电池氢气循环系统喷射器设计方法综述[J]. 上海理工大学学报, 2024, 46(6): 620-628.

Citation: DAI Zhengshu, DING Zherui, XIANG Jiabin, et al. Review on design methods of ejectors used in the fuel cell hydrogen recirculation system[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2024, 46(6): 620-628.

convergent nozzle hydrogen ejectors, multi convergent nozzle hydrogen ejectors, and convergent-divergent nozzle hydrogen ejectors. Finally, the current state of hydrogen ejector design was summarized, and the future directions for improving hydrogen ejector design were pointed out.

Keywords: ejector; hydrogen recirculation; proton exchange membrane fuel cell; design method

在社会经济发展过程中, 能源消耗所产生的二氧化碳过量排放是造成全球气候变暖和极端天气出现的重要原因。氢能以能量密度高、清洁等优点, 已成为全球能源领域未来重要的战略方向^[1-3]。交通运输领域全球碳排放约占总排放量的 25%^[4], 氢能的合理利用是实现交通运输领域大规模深度脱碳的有效路径^[5], 有助于推动我国实现“双碳”目标。

氢燃料电池汽车具有加氢时间短、无污染、能量密度高等特点, 在大载重、长续航、高强度的交通运输体系中具有先天优势^[6], 目前已部分投入实际应用^[7]。质子交换膜燃料电池(PEMFC)是氢燃料电池的一种, 其结构如图 1 所示^[8]。工作过程中, 在阳极通入纯氢气, 经过电极反应后, 有未反应完全的氢气剩余, 若直接排放到大气中, 会造成环境污染及能源浪费, 同时存在极大安全隐患。为了解决这一问题, 可采用不同的氢气循环系统来回收未反应的氢气^[9-10]。

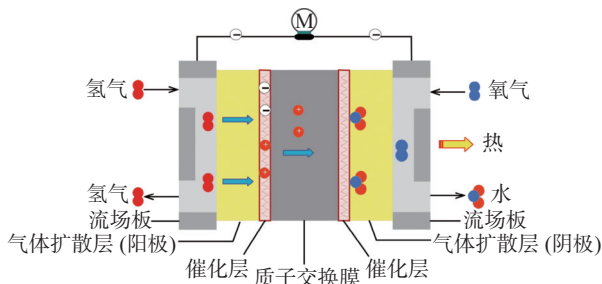


图 1 质子交换膜燃料电池结构示意图^[8]

Fig.1 Schematic diagram of the proton exchange membrane in the fuel cell^[8]

氢气循环系统的设计是燃料电池电堆的关键技术, 直接影响电堆的性能及可靠性^[11]。传统的氢气循环系统采用循环泵将未反应氢气泵送回电堆, 该方案存在耗电大、噪声大、润滑油易污染氢气、质量流量难于精确控制等缺点。为了避免这些问题, Merritt 等^[12]提出将喷射器引入氢气循环系统中替代循环泵, 该方案具有无运动部件、无需外部能耗、结构紧凑、运行可靠、无污染、成本低廉、可以使氢气循环系统更快达到稳定等优点^[13-14], 系统如图 2 所示^[15]。高压氢气经过调压作

为工作流体进入氢气喷射器, 流经喷嘴后在喷嘴出口形成低压区, 从而卷吸从燃料电池阳极回来的未反应的氢气与水蒸气混合物, 两股流体在混合段进行动量及能量的交换后进入扩压段, 在扩压段速度能转变为压力能, 混合流体进入燃料电池阳极, 如此循环以利用反应中未反应的氢气。

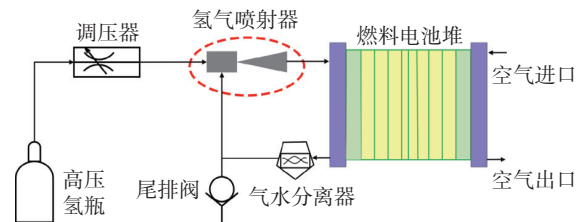


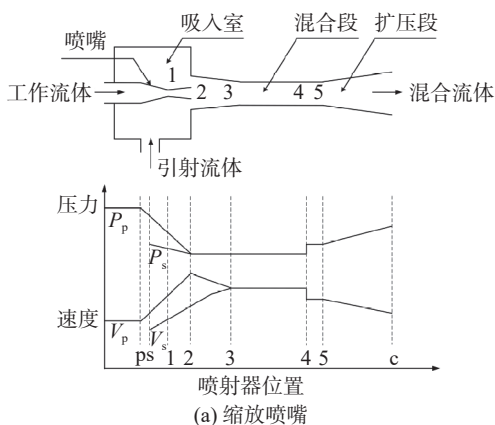
图 2 采用喷射器的氢气循环系统示意图^[15]

Fig.2 Schematic diagram of the hydrogen recirculation system with an ejector^[15]

氢气喷射器作为氢气循环系统中的关键部件, 其性能的优劣直接决定了氢气循环系统效率, 进而决定燃料电池系统性能及可靠性。国内外众多学者对其展开研究, Liu 等^[16]对应用于质子交换膜燃料电池氢气循环系统的喷射器研究现状进行了较为全面的综述, 主要包括氢气喷射器基本结构和工作原理、尺寸优化的数值模拟和实验研究现状、扩大喷射器工作范围和改进燃料输送系统控制策略。Feng 等^[17]指出设计适合氢气循环系统宽工况运行的喷射器是一个挑战, 并着重对氢气喷射器特性、结构设计优化、不同结构喷射器比较和系统控制进行了综述, 并指出未来研究方向。Han 等^[18]对燃料电池氢气循环系统的关键部件进行了综述, 包括机械氢泵、喷射器和气水分离器。在对喷射器进行综述时, 主要从喷射器工作原理、尺寸优化、多喷嘴喷射器研究现状、喷射器内部复杂流动现象等方面进行。目前, 对于高效氢气喷射器的设计方法尚未成熟, 公开发表文献中的设计方法也不尽相同, 而现有综述文献也并未对目前采用的氢气喷射器的设计方法进行详细的对比和讨论, 故本文对公开发表文献中氢气喷射器的设计方法进行了全面梳理和比较, 旨在为高效氢气喷射器的设计提供依据。

1 喷射器工作原理

喷射器主要由喷嘴、吸入室、混合段以及扩压段4个部分组成。高压工作流体在经过喷嘴后压力降低、速度增加,在喷嘴出口附近形成低压区。引射流体入口压力与低压区存在压差,在压差的作用下,引射流体被抽吸到吸入室。随后,工作流体和引射流体进入混合段进行质量、动



量、能量交换,两股流体完成混合过程后达到同一速度。最后,混合流体流入扩压段,压力上升,速度下降。整个过程中喷射器起到了对引射流体的抽吸和升压作用。实际上,喷射器内部流动相当复杂^[19],根据喷嘴结构不同,可分为缩放喷嘴喷射器和渐缩喷嘴喷射器,其沿轴向的压力和速度变化规律如图3所示^[20]。工作流体在缩放喷嘴出口处可达超音速,在渐缩喷嘴出口处可达音速。

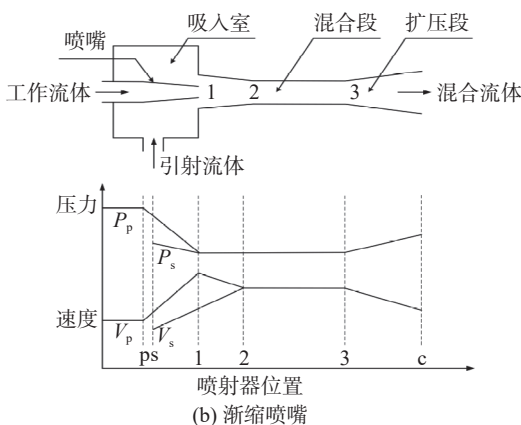


图3 喷射器内部压力和速度沿轴向变化规律^[20]

Fig.3 The variation of static internal pressure and velocity along the axial direction of the ejector^[20]

2 氢气喷射器设计方法

喷射器设计方法主要有经验系数法、经典热力学法和气体动力学函数法^[21]。经验系数法以实验图表和经验公式作为主要依据来计算喷射器结构尺寸。如利用工作流体、引射流体和喷射器出口混合流体的状态参数,计算出膨胀比和压缩比,结合经验曲线来得到喷射系数。经验系数法在设计过程中使用简便,不用进行大量计算,但是实验图表的应用范围有限,且相关经验系数的选取要求设计者具有一定的经验,一般较少使用^[22-23]。经典热力学法在热力学第一定律和第二定律的基础上对喷射器内部的热力过程进行计算。计算过程中采用了一些假设条件来简化模型,如工作流体和引射流体进行等压混合,不考虑工作流体和引射流体进口速度和混合流体出口速度等。经典热力学法物理含义明确,计算也较为简便,但该方法对混合过程进行了简化,设计得到的喷射器性能与实际情况有一定误差^[24-26]。气体动力学函数法是在动量守恒和能量守恒的基础上,应用气体动力学函数将气体热力学参数与折算等熵速度联系起来。同时结合了前苏联热工研究所

的实验结果,采用速度系数对部分公式进行修正。气体动力学函数法设计的喷射器尺寸较为精确,但是模型较为复杂^[27]。

燃料电池氢气循环系统中的氢气喷射器,其自身具备一些特点,近年来受到广泛关注。本节将对目前公开发表文献中氢气喷射器的设计方法进行梳理。

2.1 渐缩喷嘴喷射器设计

在氢气循环系统中,燃料电池阳极出口含有大量水蒸气,这意味着氢气喷射器引射流体入口氢气中含有水蒸气。在超音速条件下,水蒸气有较强的可压缩性,压缩波或膨胀波的出现会对流动产生较大影响。水蒸气在膨胀降温过程中会发生非平衡凝结现象,当温度达到0℃以下,水蒸气还会发生结冰现象,同时超音速流动中会产生激波效应。为了保证氢气喷射器高效稳定运行,多采用渐缩喷嘴以防止水蒸气冷凝结冰和避免物理磨损及噪声^[28-31]。

2.1.1 单个渐缩喷嘴喷射器设计

Kim等^[32]在临界工作模式下,基于一维模型和敏感度分析,提出了汽车燃料电池氢气喷射器的降成本设计方法。通过选择重要的设计因素,

基于敏感度分析的部件模型非常有效地减少了开发定制喷射器的时间和成本。以 Huang 等^[33]的一维热力学模型为基础,建立了渐缩喷嘴喷射器临界模式设计的一维热力学模型。所有热力学模型关系式均采用 Huang 等^[33]的热力学模型,不同的是:引射流体质量流量为输入参数;对工作流体压力进行迭代计算。而 Huang 等^[33]的模型通过对等截面积混合段面积进行迭代。同时,通过敏感度分析,得到工作流体质量流量与引射流体压力是影响喷射系数的主要影响因素。最后,通过敏感度分析,确定根据工作流体质量流量以及引射流体压力进行多次设计,设计出4个喷射器,根据实验结果选择最佳设计。Li 等^[34]基于一维等压混合模型,设计了渐缩喷嘴氢气喷射器,参考了 Kim 等^[32]的设计方法。Yin 等^[35]首先确定了喷射器的几个重要参数,计算了渐缩喷嘴喉部直径,并根据文献[30]推荐值确定了等截面积混合段直径为2.5倍的喷嘴喉部直径,根据文献[36]确定了喷嘴的渐缩角度和轴向长度,以及扩压段扩散角和轴向长度。其次,在上述尺寸确定的基础上,运用计算流体力学模型对其余参数进行优化,包括引射流体入口尺寸、吸入室直径、混合段倾斜角和轴向长度,以及等截面积混合段轴向长度。最后,得到喷射器初始尺寸。Besagni 等^[37]提出了一种集总参数耦合计算流体力学方法预测喷射器性能的新方法。在确定喷射器初始尺寸时,采用等压混合设计理论,文中并未详细介绍渐缩喷嘴的计算方法,并根据文献[38]中的推荐值确定了等截面积混合段直径为4倍的喷嘴喉部直径;根据混合段压降与流体流动是否达到充分发展进而在扩压段产生流动分离两方面的因素,等截面积混合段轴向长度取喷嘴喉部直径的18倍,扩压段发散角取 6° ^[39]。Nikiforow 等^[40]通过最大氢气消耗质量流量和最大供氢压力计算得到了渐缩喷嘴的喉部直径。其余主要参数,如等截面积混合段直径和长度、喷嘴出口距等截面积混合段距离、扩压段发散角和轴向长度等参考文献[41-42]得到。Du 等^[43]计算了渐缩喷嘴的喉部直径,其余喷射器参数均参考文献[35],并直接给出了引射流体辅助引射入口的尺寸。Hosseinzadeh 等^[41]认为在设计喷射器时应考虑许多参数,但是根据文献[39]和文献[44],只有两个关键参数对喷射器性能起着至关重要的作用。作者先是计算了渐缩喷嘴喉部直

径,并根据文献[38]确定了等截面积混合段直径,并讨论了等截面积混合段轴向长度的影响因素及取值^[39,45-46],最后根据文献[39]确定了扩压段的轴向长度为4~12倍的等截面积混合段直径以及扩散角为 $5^\circ\sim 12^\circ$ 。Bian 等^[47]基于文献[48]采用的索科洛夫气体动力学函数法对渐缩喷嘴喷射器进行设计,不同于其他文献中渐缩喷嘴喉部为音速的设定,该研究中渐缩喷嘴喉部为亚音速的设定。喷射器喷嘴喉部直径通过计算得到,其余主要参数如喷嘴收敛角度和轴向长度、等截面积混合段直径、扩压段扩散角度和长度等根据文献[30]和文献[39]确定。

为了适应燃料电池氢气循环系统的应用场景,许多学者在喷射器的设计过程中考虑了引射流体中水蒸气的影响。Kim 等^[29]提出了一种考虑引射流体中含有水蒸气的亚音速氢气喷射器设计方法,该方法中引入湿氢气的物性参数,在给定设计工况条件下,通过给喷射器出口压力赋值进行迭代,最后得到渐缩喷射器喉部直径和喷射器等截面积混合段直径。计算过程中的主要关系式参考了 Huang 等^[33]的热力学模型。张龙海等^[49]针对燃料电池氢气循环系统阳极出口氢气含大量水蒸气的特点,提出了一种适用于引射流体含水蒸气的亚音速喷射器热力学设计模型,比较了引射流体为干氢和含有水蒸气湿氢两种不同条件下的喷射器设计尺寸。模型考虑了工作流体在渐缩喷嘴的膨胀过程、工作流体与引射流体在吸入室的混合过程、混合段及扩压段的流动描述,并采用了温度、压力和面积与马赫数的关系式^[33]。通过比较设计结果,不考虑水蒸气时,喷嘴直径和混合室直径均小于考虑水蒸气时的设计尺寸。Dadvar 等^[50]指出在大多数公开发表文献中,喷射器设计模型是作为质子交换膜燃料电池氢气循环系统中的独立部分,并没有与燃料电池电堆的参数耦合在一起,故提出了直径比(等截面积混合段直径与渐缩喷嘴喉部直径之比)和尺寸比(与电池数量、电池活性面积和喷嘴喉部直径相关)两个无量纲参数,将喷射器设计尺寸与燃料电池电堆参数联系起来。该文献中喷射器的模型是以文献[30]为基础进行修改的,增加了直接计算临界与亚临界工作模式下工作流体压力的两个公式,这两个公式包含了电堆电池数和电池活性面积,换言之,这两个参数将作为喷射器设计的输入参数。另外,

该文献的设计模型考虑了混合段和扩压段中流体的变化情况。

Liu 等^[51] 只用一句话说明了其喷射器设计是参考文献 [30,35,39,50] 进行的, 并省略了设计过程直接给出喷射器各部分尺寸。Li 等^[52] 在渐缩喷嘴喷射器初始尺寸的设计中, 参考 Zhu 等^[53] 的热力学模型, 考虑了引射流体中含有水蒸气的影响, 计算了喷嘴喉部直径以及等截面混合段直径。混合段直径是在给定的引射流体质量流量下通过迭代计算确定的, 引射流体流量计算公式中包含体现引射流体是混合物的平均密度。其他喷射器的尺寸则是通过文献 [27] 求得。Tri 等^[54] 在喷射器设计时, 与 Dadvar 等^[50] 采用的方法类似, 也考虑了混合段与扩压段的流动描述, 不同的是该文献中没有采用直接计算工作流体压力的关系式。

在上述模型中, 文献 [30,50,54] 都采用了引射流体平均密度计算引射流体氢气与水蒸气混合物的质量流量, 而文献 [29,49] 则是计算了氢气和水蒸气混合物的分子量和引射流体中水蒸气的质量分数。

2.1.2 多个渐缩喷嘴喷射器设计

随着汽车车况的改变, 燃料电池输出功率会发生变化, 进而改变氢气循环系统中喷射器的运行工况。众所周知, 喷射器在偏离设计工况条件下, 其性能会急剧下降。为了提高氢气喷射器的变工况性能, 许多学者提出采用多喷嘴氢气喷射器。

Song 等^[55] 设计了一种对称的双渐缩喷嘴喷射器, 如图 4 所示, 该喷射器的参数是基于 Yin 等^[35] 的设计方法进行设计。不同的是在计算喷嘴喉部直径时, 该文没有考虑工作流体流经喷嘴的等熵系数。其余尺寸几乎完全依照文献 [35] 取值。在计算出总的喷嘴喉部面积之后, 再平均分配给两个喷嘴。

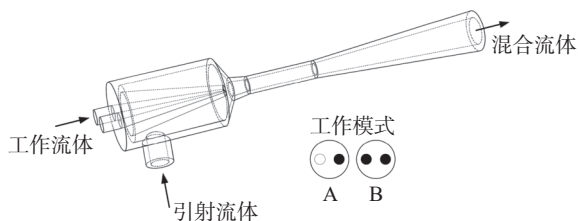


图 4 一种对称的双渐缩喷嘴喷射器^[55]

Fig.4 A symmetrical dual convergent nozzle ejector^[55]

Xue 等^[15] 设计了一个由 4 个渐缩喷嘴组成的多喷嘴喷射器, 如图 5 所示。其喷嘴喉部总面积的设计方法完全参照文献 [35], 并将其等分为 4 个

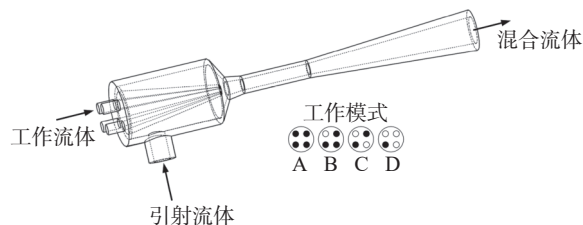


图 5 由 4 个渐缩喷嘴组成的多喷嘴喷射器^[15]

Fig.5 Multi-nozzle ejector composed of four convergent nozzles^[15]

喷嘴喉部面积。喷射器的其余尺寸几乎完全采用了文献 [35] 的取值。

Han 等^[56] 设计了一种由两个渐缩对称喷嘴和一个渐缩中心喷嘴组成的多喷嘴喷射器, 如图 6 所示。在计算对称喷嘴及中心喷嘴的喉部面积时, 并未考虑等熵系数。先在质子交换膜燃料电池对应最大工作流体流量条件下, 计算对称喷嘴的喉部总面积, 并平均分配。并且利用计算流体力学方法, 找到对称喷嘴随着工作流体质量流量的减小到不能工作的工况, 在对称喷嘴不工作的情况下, 用这个临界值对中心喷嘴喉部面积进行计算。等截面混合段直径和对称喷嘴倾角将通过数值模拟确定。喷嘴出口到等截面混合段入口距离参考 Zhu 等^[57] 的研究结果确定, 为 2 倍的等截面混合段直径。等截面混合段长度确定为 6 倍的等截面混合段直径, 扩压段轴向长度选取了 10 倍的等截面混合段直径, 扩压段的发散角选取了 4° ^[36,42]。

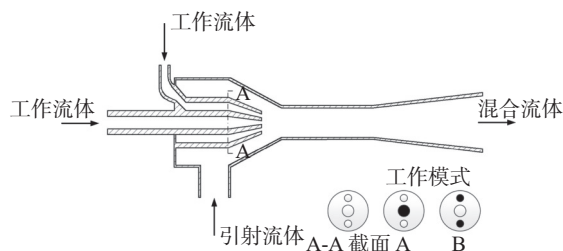
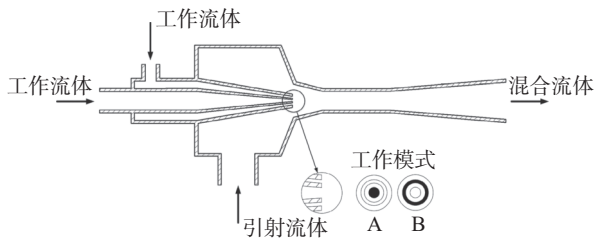


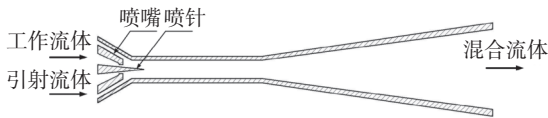
图 6 由两个渐缩对称喷嘴和一个渐缩中心喷嘴组成的多喷嘴喷射器^[56]

Fig.6 Multi-nozzle ejector composed of two symmetrical convergent nozzles and a central convergent nozzle^[56]

Du 等^[58] 基于 Yin 等^[35] 的方法设计了一个同轴双喷嘴喷射器, 如图 7 所示。除了喷嘴部分的尺寸, 其余尺寸几乎完全参考文献 [35]。在计算喷嘴部分的尺寸时, 没有考虑等熵系数, 先计算了设计工况下总的渐缩喷嘴出口面积, 然后根据最大工作流体压力和最小工作流体压力对第一喷嘴和第二喷嘴进行了面积分配。

图 7 同轴双喷嘴喷射器^[58]Fig.7 Coaxial twin-nozzle ejector^[58]

Brunner 等^[46]建立了二维轴对称计算流体力学喷射器模型,对图 8 中的喷射器尺寸进行了设计。喷针安装在渐缩喷嘴处,通过改变喷嘴出口面积来改变通过的质量流量。渐缩喷嘴出口直径以及等截面积混合段直径由燃料电池运行工况的最大质量流量确定。等截面积混合段轴向长度、喷嘴出口至等截面积混合段入口距离和渐缩喷嘴渐缩角度对喷射器性能影响较大,需要进行优化设计,其余尺寸更多考虑由制造因素决定。但该文并未详细描述喷射器设计过程中尺寸优化的具体过程。

图 8 带喷针的可调喷射器^[46]Fig.8 An adjustable ejector with a spindle^[46]

Jenssen 等^[59]则是简要指出其喷射器设计是参考了 Brunner 等^[46]的设计方法,对利用喷针改变喷嘴出口面积的可变喷射器进行了设计。

2.2 缩放喷嘴喷射器设计

在现有公开发表文献中,绝大多数为渐缩喷嘴喷射器,但仍有少部分氢气喷射器采用了缩放喷嘴进行设计。许思传等^[60]采用索科洛夫的气体动力学函数法^[27]对应用于高压大功率(80 kW)质子交换膜燃料电池氢气循环系统的喷射器进行了设计。与大多数文献不同,该文中采用的是缩放喷嘴的喷射器。首先求得设计工况条件下的最大喷射系数,然后再计算各个尺寸参数。Wang 等^[48]同样采用了缩放喷嘴的喷射器,并利用索科洛夫一维气体动力学函数法进行设计,并在后续 10 kW 质子交换膜燃料电池氢气循环系统研究^[61]中采用了与该文相同的设计方法。

文献 [60] 和文献 [48] 都采用了索科洛夫的气体动力学函数法,利用质量守恒、能量守恒及动量守恒求取了喷射器各部分的尺寸参数,但对等

截面积混合段的轴向长度及扩压段轴向长度的取值上略有不同,具体见表 1,其中 D_2 为等截面积混合段直径, D_3 为扩压段出口直径。

表 1 设计参数比较

Tab.1 Comparison of design parameters

	等截面积混合段 轴向长度	扩压段 轴向长度
许思传等 ^[60]	$(6-10)D_2$	$(6-7)(D_3 - D_2)$
Wang 等 ^[48]	$4 D_2$ ^[62]	$8 D_2$ ^[62]

另外,通过计算,文献 [60] 设计工况的压缩比为 1.12,在这种较小压缩比的情况下,喷射器工作流体、引射流体及混合流体采用相同绝热指数是不合理的,此时可以将引射流体和混合流体视为非弹性介质^[27],即不可压缩,绝热指数为无穷。

3 结 论

对质子交换膜燃料电池氢气循环系统中的氢气喷射器的设计方法进行了梳理,得到如下结论:

a. 质子交换膜燃料电池氢气循环系统中的氢气喷射器,绝大多数文献采用的是渐缩喷嘴,以避免引射流体中的水蒸气在超音速条件下产生非平衡凝结及激波等复杂现象,保证喷射器高效稳定运行。同时,现有文献中大多数采用了热力学模型,只有少部分学者采用了气体动力学函数法且采用了缩放喷嘴。

b. 针对质子交换膜燃料电池氢气循环系统应用场景,提出了一些有针对性的解决方案。针对燃料电池阳极出口氢气含大量水蒸气的特点,部分文献在氢气喷射器的设计阶段就考虑了水蒸气的影响,设计结果与不考虑水蒸气时的相比,喷嘴直径和混合段直径均偏大;针对燃料电池输出功率随车况不断变化的特点,部分学者提出了多喷嘴喷射器,使得喷射器在变工况条件下能尽可能保持较高性能,但设计阶段喷嘴喉部面积的分配方法较为简单,大多采用平均分配的方法。

c. 目前,质子交换膜燃料电池氢气循环系统中氢气喷射器的设计模型较为独立,只有极少数学者试图将氢气喷射器设计与整个燃料电池系统参数联系起来。

基于以上结论,未来可以在以下几个方面对应用于质子交换膜燃料电池氢气循环系统的氢气喷射器设计进行改进:

a. 将氢气喷射器的设计模型与燃料电池电堆的参数进行耦合, 不仅考虑氢气喷射器独立部件的性能, 同时也可以从质子交换膜燃料电池系统性能出发为氢气喷射器的设计提供依据。

b. 在多喷嘴氢气喷射器设计方面, 则需要通过一些理论与实验研究, 对多喷嘴在喷射器中的空间结构布置、喷嘴面积分配等问题进行研究, 从而为多喷嘴氢气喷射器的设计提供指导。

c. 尝试使用气体动力学函数法, 在适用于质子交换膜燃料电池氢气循环系统中氢气喷射器的压缩比范围内, 对采用渐缩喷嘴的氢气喷射器进行设计。

参考文献:

- [1] 殷伊琳. 我国氢能产业发展现状及展望 [J]. 化学工业与工程, 2021, 38(4): 78–83.
- [2] 中国氢能联盟. 中国氢能源及燃料电池产业白皮书 [M]. 北京: 中国氢能联盟, 2019.
- [3] 国家能源局. 国家能源局关于《中华人民共和国能源法 (征求意见稿)》公开征求意见的公告 [J]. 电力设备管理, 2020(4): 16–25.
- [4] 凌文, 李全生, 张凯. 我国氢能产业发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 80–88.
- [5] 徐向梅. 氢能产业如何健康有序发展 [N]. 经济日报, 2022-06-22(11).
- [6] 刘应都, 郭红霞, 欧阳晓平. 氢燃料电池技术发展现状及未来展望 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(4): 162–171.
- [7] 张程. 碳中和下的“氢经济” [J]. 检察风云, 2022(2): 70–71.
- [8] AUTHAYANUN S, IM-ORB K, ARPORNWICHANOP A. A review of the development of high temperature proton exchange membrane fuel cells[J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2015, 36(4): 473–483.
- [9] LIANG X, KANG H F, SHEN J, et al. Review and analysis of hydrogen recirculation devices for compact vehicular proton exchange membrane fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2023, 555: 232308.
- [10] 董凯瑞, 刘广彬, 高志成. 燃料电池氢气循环系统综述 [J]. 电源技术, 2021, 45(4): 545–551.
- [11] HOU J B, YANG M, ZHANG J L. Active and passive fuel recirculation for solid oxide and proton exchange membrane fuel cells[J]. *Renewable Energy*, 2020, 155: 1355–1371.
- [12] MERRITT R D, GORBELL B N. Electrochemical fuel cell system with a regulated vacuum ejector for recirculation of the fluid fuel stream[P]. USA, 5441821. 1995-08-15.
- [13] TOGHYANI S, AFSHARI E, BANIASADI E. A parametric comparison of three fuel recirculation system in the closed loop fuel supply system of PEM fuel cell[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(14): 7518–7530.
- [14] KUO J K, JIANG W Z, LI C H, et al. Numerical investigation into hydrogen supply stability and I-V performance of PEM fuel cell system with passive Venturi ejector[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 169: 114908.
- [15] XUE H Y, WANG L, ZHANG H L, et al. Design and investigation of multi-nozzle ejector for PEMFC hydrogen recirculation[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(28): 14500–14516.
- [16] 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.
- [17] FENG J M, HAN J Q, PANG Z H, et al. Designing hydrogen recirculation ejectors for proton exchange membrane fuel cell systems[J]. *Energies*, 2023, 16(3): 1201.
- [18] HAN J Q, FENG J M, CHEN P, et al. A review of key components of hydrogen recirculation subsystem for fuel cell vehicles[J]. *Energy Conversion and Management: X*, 2022, 15: 100265.
- [19] HE S, LI Y, WANG R Z. Progress of mathematical modeling on ejectors[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(8): 1760–1780.
- [20] 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.
- [21] 松鹏. 汽车废热驱动新型喷射制冷系统研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [22] 王红霞. 气体喷射器的设计及数值模拟研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [23] 谭江明. 压缩制冷式喷射器流场数值模拟研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2015.
- [24] 戴征舒. 内部损失对喷射器性能影响的理论与实验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [25] 徐鑫. 喷射器内部流动及设计方法的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [26] 付维娜. 蒸汽喷射器内部流动规律及其结构优化研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
- [27] 索科洛夫, 津格尔. 喷射器 [M]. 黄秋云, 译. 北京: 科学出版社, 1977.
- [28] CORBELLA C X. Implementation and characterization of an ejector based hydrogen recirculation system for a

- PEM fuel cell[M]. Barcelona: Polytechnic University of Catalonia, 2015.
- [29] 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.
- [30] ZHU Y H, LI Y Z. New theoretical model for convergent nozzle ejector in the proton exchange membrane fuel cell system[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 191(2): 510–519.
- [31] 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.
- [32] KIM M, SOHN Y J, LEE W Y. Cost reduced design and performance test of the ejector for a proton exchange membrane fuel cell based on the sensitivity analysis[J]. *ECS Transactions*, 2008, 12(1): 147–155.
- [33] HUANG B J, CHANG J M, WANG C P, et al. A 1-D analysis of ejector performance[J]. *International Journal of Refrigeration*, 1999, 22(5): 354–364.
- [34] LI F Q, DU J Y, ZHANG L H, et al. Experimental determination of the water vapor effect on subsonic ejector for proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(50): 29966–29970.
- [35] YIN Y, FAN M Z, JIAO K, et al. Numerical investigation of an ejector for anode recirculation in proton exchange membrane fuel cell system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 126: 1106–1117.
- [36] ESDU. Ejectors and jet pumps[S]. London: ESDU International Ltd., 1985.
- [37] BESAGNI G, MEREU R, INZOLI F, et al. Application of an integrated lumped parameter-CFD approach to evaluate the ejector-driven anode recirculation in a PEM fuel cell system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 121: 628–651.
- [38] ALVES G E. Ejector design and performance[D]. Newark: University of Delaware, 1951.
- [39] ZHU Y H, CAI W J, WEN C Y, et al. Fuel ejector design and simulation model for anodic recirculation SOFC system[J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 173(1): 437–449.
- [40] 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.
- [41] HOSSEINZADEH E, ROKNI M, JABBARI M, et al. Numerical analysis of transport phenomena for designing of ejector in PEM forklift system[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(12): 6664–6674.
- [42] MAGHSOODI A, AFSHARI E, AHMADIKIA H. Optimization of geometric parameters for design a high-performance ejector in the proton exchange membrane fuel cell system using artificial neural network and genetic algorithm[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 71(1): 410–418.
- [43] DU Z Q, ZHANG C, XI F Q, et al. Designing and performance investigations on an ejector with auxiliary inlet for PEMFC hydrogen recirculation system[C]//Proceedings of the 33rd Chinese Control and Decision Conference. Kunming: IEEE, 2021.
- [44] YAN J, CAI W J. Area ratio effects to the performance of air-cooled ejector refrigeration cycle with R134a refrigerant[J]. *Energy Conversion and Management*, 2012, 53(1): 240–246.
- [45] MARSANO F, MAGISTRI L, MASSARDO A F. Ejector performance influence on a solid oxide fuel cell anodic recirculation system[J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 129(2): 216–228.
- [46] BRUNNER D A, MARCK S, BAJPAI M, et al. Design and characterization of an electronically controlled variable flow rate ejector for fuel cell applications[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(5): 4457–4466.
- [47] BIAN J, ZHANG Y, LIU Y, et al. Structural optimization of hydrogen recirculation ejector for proton exchange membrane fuel cells considering the boundary layer separation effect[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 397: 136535.
- [48] WANG X H, XU S C, XING C M. Numerical and experimental investigation on an ejector designed for an 80 kW polymer electrolyte membrane fuel cell stack[J]. *Journal of Power Sources*, 2019, 415: 25–32.
- [49] 张龙海, 李晓锦, 李进, 等. 基于热力学模型的 PEMFC 用喷射器的设计 [J]. 电源技术, 2014, 38(10): 1824–1827, 1897.
- [50] DADVAR M, AFSHARI E. Analysis of design parameters in anodic recirculation system based on ejector technology for PEM fuel cells: A new approach in designing[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(23): 12061–12073.
- [51] LIU Z R, LIU Z, JIAO K, et al. Numerical investigation of ejector transient characteristics for a 130 - kW PEMFC system[J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44(5): 3697–3710.
- [52] LI C, SUN B G, LUO Q H. Effect of structural parameters and operational characteristic analysis on

- ejector used in proton exchange membrane fuel cell[J]. *Sustainability*, 2022, 14(15): 9205.
- [53] ZHU Y H, CAI W J, LI Y Z, et al. Anode gas recirculation behavior of a fuel ejector in hybrid solid oxide fuel cell systems: Performance evaluation in three operational modes[J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 185(2): 1122–1130.
- [54] TRI D T L, VU H N, NGUYEN H L, et al. A comparative study of single and dual ejector concepts for anodic recirculation system in high-performance vehicular proton exchange membrane fuel cells[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(70): 27344–27360.
- [55] 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.
- [56] HAN J Q, FENG J M, HOU T F, et al. Performance investigation of a multi - nozzle ejector for proton exchange membrane fuel cell system[J]. *International Journal of Energy Research*, 2021, 45(2): 3031–3048.
- [57] ZHU Y H, CAI W J, WEN C Y, et al. Numerical investigation of geometry parameters for design of high performance ejectors[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(5/6): 898–905.
- [58] 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.
- [59] JENSSEN D, BERGER O, KREWER U. Improved PEM fuel cell system operation with cascaded stack and ejector-based recirculation[J]. *Applied Energy*, 2017, 195: 324–333.
- [60] 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.
- [61] WANG X H, LU Y K, ZHANG B T, et al. Experimental analysis of an ejector for anode recirculation in a 10 kW polymer electrolyte membrane fuel cell system[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(3): 1925–1939.
- [62] ZHU Y H, JIANG P X. Geometry optimization study of ejector in anode recirculation solid oxygen fuel cell system[C]//2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Beijing: IEEE, 2011:51–55.

(编辑: 黄 娟)