

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.01.023

车用燃料电池氢气循环系统引射特性研究

赵海贺, 陈泽宇, 覃承富, 郭晓冰

(东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要:燃料电池电动汽车是新能源汽车的重要发展方向,燃料电池作为整车的核心能量单元,其工作性能直接影响车辆经济性、动力性及可靠性。氢气循环系统中,引射器是燃料电池的重要功能元件,文中首先基于索科洛夫设计法对引射器进行结构与建模,然后开展了引射流体的流场分析,最后基于分析结果探究了引射性能的关键影响因素。结果表明,在不同压力工况下,引射系数与工作流体入口直径呈抛物线趋势,引射系数与引射流体入口直径正相关,引射系数随混合流体出口直径的增加呈现先增后减的趋势。基于上述影响规律对引射系数进行优化,可使引射器回氢性能提高13.55%,改善了燃料电池的氢气利用率,进一步完善了引射器结构优化与引射特性研究。

关键词:新能源汽车;燃料电池;供氢系统;循环特性;引射器;计算流体动力学

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2022)01-0173-07

0 引言

随着环境与能源问题日益严峻,发展替代能源汽车已成为世界各大汽车厂商及科研机构的研究热点^[1-4]。燃料电池电动汽车凭借能量转换效率高、零污染且能源来源广泛的技术优势,被普遍认为是未来汽车发展的重要趋势之一^[5-9]。当下普遍采用的质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)具有启动快、功率密度高、易密封的特点,可通过供应过量氢气的方法来保证输出功率的稳定。电堆阳极产生的废气中包含水和一定量未反应的氢气,因此,PEMFC非常依赖氢气循环系统来实现对阳极残余废气的循环利用,从而提高电池的燃料利用率和电池效率。引射器是氢气循环系统的重要组成部分,负责回氢系统的引射、混合、压缩等多种功能^[10-13],然而引射器的工作性能受流体压力、尺寸结构等多种因素影响,且存在强烈的非线性、流固耦合问题,因此,如何实现引射器的高效运作和优化设计是当前亟需解决的重要技术问题。

目前研究人员对引射器实验与仿真方法进行了广泛研究。文献[14]采用实验与数值模型相结合的方式研究了喷嘴面积与流体压力对引射器性能的影响,结果发现通过改变喷嘴面积和流体压力可以实现对引射性能的控制。文献[15]采用3种湍流模型对引射器进行数值模拟,结果发现剪切应力运输(shear stress transport, SST) $k-\varepsilon$ 湍流模型更适

用于预测引射器性能,而 Re-Normalization Group (RNG) $k-\varepsilon$ 和 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型则适用于优化引射器设计。文献[16]对引射器引射效率和摩尔回流率进行测试,验证了收敛型喷嘴引射器具有较好的工作性能。在引射器实验与仿真方法日益完善的基础上,如何提高引射效率作为引射器研究的核心问题受到学者们的广泛关注。文献[17]模拟引射器的全工况,发现流体质量流量会对引射性能产生较大影响,并给出工作流体质量流量的取值范围。文献[18]提出有关 PEMFC 氢气循环系统中收敛式喷嘴引射器几何参数的优化方法,并基于混合人工鱼群算法对引射器的几何参数进行优化。文献[19-20]研究了混合室收敛角对流量特性的影响,并给出混合室收敛角取值范围。

目前,燃料电池引射器的相关研究缺乏足够实验数据支撑,并且性能优化与特性研究方面仍不够完善。文中以车用 PEMFC 为研究对象,对引射器特性进行仿真与分析,在不同压力工况下采用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法对引射器结构参数的影响规律进行仿真研究,基于仿真数据分析了关键结构参数与引射性能之间的关系,为引射器结构优化提供了数据和方法。

1 氢气供给系统

1.1 PEMFC 基本原理

PEMFC 主要由膜电极组件和双极板两部分组成,此外还包括密封件、集流板等^[21]。双极板与膜电极构成了单体电池,应用中将单体电池固定于特定的密封装置中,利用端板压紧,使用螺杆等进一

收稿日期:2021-08-25;修回日期:2021-11-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977029)

步固定,单体电池堆集组成燃料电池电堆。整体来看,燃料电池结构与三明治相似,中间为质子交换膜,两侧为催化剂层,氢燃料电池的催化剂层一般为铂基,向外与其相邻的是扩散层和双极板。PEMFC 的工作原理如图 1 所示,膜层将其划分为阴极、阳极两部分,外回路导通,电池工作时扩散层内的反应气体扩散到催化层,气体燃料在催化作用下发生如下电化学反应。

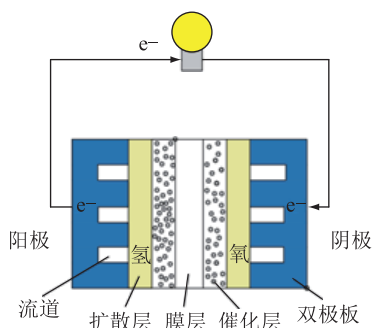
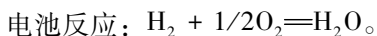
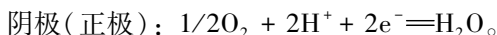
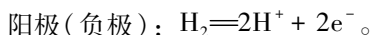


图 1 PEMFC 的工作原理
Fig.1 Working principle of PEMFC

进入电池阳极的氢失去电子,反应后产生的氢离子进入电解质,与进入阴极的氧气发生化学反应。电子则是经过外部回路到达燃料电池的阴极参与反应,最终生成水。整个反应伴随着热的产生。上述反应持续进行,电子不断地通过外部回路,完成发电。

1.2 氢气循环系统

PEMFC 氢气循环系统见图 2,在工作过程中,通过供应过量氢气的方法来保证输出功率稳定^[22]。随着燃料电池内部反应的进行,电堆阳极废气中包含水和一定量未反应的氢气,利用水气分离装置将残余氢气分离出来并传输至引射器。引射器可利用高压氢气产生负压进而回收未反应的残余氢气,且不产生额外的寄生功率。供应的高压氢气从引射器喷嘴喷出后进入混合室,高速气流卷吸流动形成低压区,在压差的作用下,引射残余氢气与之进入混合室,均匀混合后从出口排出^[17],参与电堆阳极反应。

1.3 引射器结构设计

文中采用索科洛夫引射器设计法,基于 80 kW 工况对 PEMFC 电堆进行结构设计^[19,23]。工况参数如表 1 所示。根据电堆参数求出引射器结构设计所需的工作流体质量流量 G_p 后,即可结合工况参数,

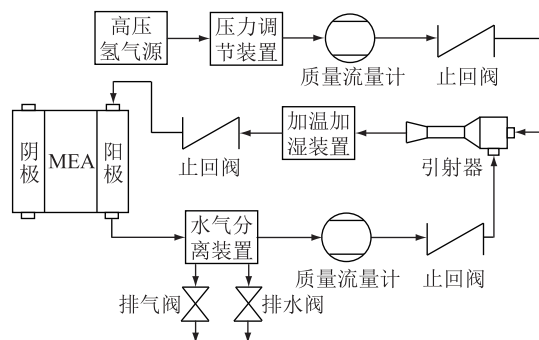


图 2 氢气循环系统的组成及相关器件
Fig.2 Composition and related devices of hydrogen circulation system

利用经验公式计算出引射器的结构尺寸^[24]。结构参数包括工作流体喷嘴截面尺寸、等容混合室截面尺寸、引射器轴向尺寸等。

表 1 设计工况点参数
Table 1 Design operating point parameters

参数	工作流体	引射流体	混合流体
压力/ 10^5 Pa	5	2.77	3.2
温度/K	298	353	

燃料电池正常工作时所需氢气量 m_{H_2} 可由式(1)求得。

$$\begin{cases} m_{H_2} = 0.001N_{cell}I/F \\ I = iA \end{cases} \quad (1)$$

式中: I 为电池的工作电流; F 为法拉第常数; N_{cell} 为电池数目; i 为电流密度; A 为活化面积。

阳极入口水蒸气的质量分数 ω_{H_2O} 可由式(2)求得。

$$\begin{cases} \omega_{H_2O} = \frac{18X_{H_2O}}{18X_{H_2O} + 2(1 - X_{H_2O})} \\ X_{H_2O} = \frac{47\ 414.7}{2 \times 10^5} H \end{cases} \quad (2)$$

式中: X_{H_2O} 为入口水蒸气的摩尔分数; H 为氢气湿度。水蒸气在 353 K 温度下的饱和蒸汽压为 47 414.7 Pa。

阳极入口气体质量流量 m_{in} 可由式(3)求得。

$$\begin{cases} m_{in} = \frac{m_{H_2,in}}{1 - \omega_{H_2O}} \\ m_{H_2,in} = m_{H_2}\lambda \end{cases} \quad (3)$$

式中: $m_{H_2,in}$ 为阳极入口氢气质量流量; m_{H_2} 为纯氢的质量流量; λ 为氢气过量系数。

电堆的工作参数如表 2 所示,阳极入口氢气质量流量 $m_{H_2,in}$ 即为用于引射器结构计算的工作流体质量流量 G_p 。引射器结构参数的计算结果见表 3。

表2 PEMFC 电堆参数

Table 2 Stack parameters for PEMFC

参数	数值	参数	数值
电池数目 N_{cell}	381	电堆功率/kW	80
活化面积 A/m^2	0.1	氢气湿度 $H/\%$	80
电流密度 $i/(\text{A}\cdot\text{m}^{-2})$	3 500	氢气过量系数 λ	1.2

表3 引射器结构尺寸

Table 3 Ejector structure parameters

结构	尺寸/mm	结构	尺寸/mm
喷嘴直径	2.53	等容混合室直径	5.20
工作流体入口直径	10.00	等压混合室长度	8.11
引射流体入口直径	12.00	扩压段长度	30.50
混合流体出口直径	10.00	喷嘴收缩段长度	19.21

2 引射特性建模及仿真

图3为引射器结构示意图,文中采用 ANSYS/CFX 软件进行引射器的建模与仿真。选择引射系数 μ 作为引射性能的评价指标,定义为引射流体的质量流量与工作流体的质量流量之比^[21],如式(4)所示。

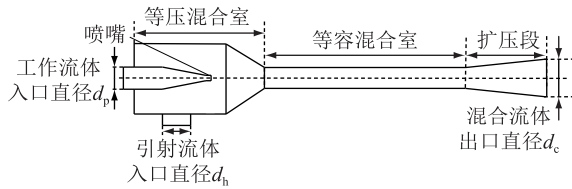


图3 燃料电池引射器结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of fuel cell ejector

$$\mu = \frac{G_H}{G_p} \quad (4)$$

式中: G_H 为引射流体的质量流量。

2.1 控制方程

引射器的数值计算采用 $k-\varepsilon$ 模型的修正方程,即 RNG $k-\varepsilon$ 模型,基于 N-S 方程组的再归一化,能更好地预测引射器内部流动情况以实现结构优化。假设流体为稳态可压缩湍流,引射器管壁为绝热壁面,工作流体与引射流体均为理想气体,忽略重力影响且无化学反应发生,则引射气体控制方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) - \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla \mathbf{U}) = \nabla \cdot p' + \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla \mathbf{U}) T + B \quad (6)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon \text{RNG}}} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1 \text{RNG}} P_k - C_{\varepsilon 2 \text{RNG}} \rho \varepsilon) \quad (7)$$

式中: ρ 为密度; t 为时间; \mathbf{U} 为速度矢量; k 为湍动能; ε 为湍动能耗散; μ_{eff} 为有效黏度; p' 为修正压力; B 为体积力总和; T 为热力学温度; μ_t 为湍流黏度; $\sigma_{\varepsilon \text{RNG}}$, $C_{\varepsilon 1 \text{RNG}}$, $C_{\varepsilon 2 \text{RNG}}$ 为系统常数。

2.2 网格划分

对于有限元分析来说,仿真精度和计算速度取决于模型网格划分质量的高低。对模型进行网格划分,初步划分后对模型边界区域、工作流体与引射流体接触混合区等处的网格适当优化加密,以保证模型网格划分的质量。最终通过网格无关性验证后的网格数量为 1 100 764 个。

2.3 边界及初始条件

引射器工作流体为理想氢气,进口边界条件按总压力进行设定;引射流体入口与混合流体出口的边界条件设定为恒定压力边界,具体设定值参照表1。流体的流态为稳态湍流,且为可压缩的理想状态。初始情况下,湍流强度为 5%,温度为 298 K,设定参数残差小于 10^{-5} 时收敛^[17,21]。

2.4 模型验证

为验证 CFD 模型的准确性,在工作流体入口压力 $4 \times 10^5 \sim 6 \times 10^5$ Pa 范围内选择 5 个点进行仿真运算,得到引射器工作流体质量流量 G_p 与工作流体压力 p_p 的变化曲线,如图4所示。 G_p 与 p_p 在该范围内呈线性正相关,符合理论推导结果^[23]。二者关系式可表示为如下形式:

$$G_p = k p_p + b \quad (8)$$

式中: k, b 为两定值。

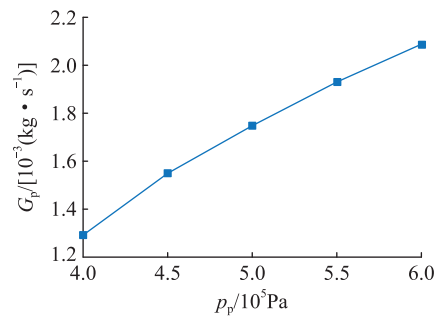


图4 工作流体质量流量与入口压力的变化曲线

Fig.4 Variation curve of working fluid mass flow and inlet pressure

3 结果与分析

3.1 内部流场分析

通过流体力学仿真得到引射器中间对称截面的压力、速度云图分别如图5、图6所示。工作流体喷嘴处压力势能转换为流体动能,工作流体速度在收敛喷嘴处迅速增大,变为超音速,压力值降至最

低速时喷嘴出口流体速度达到峰值。在高速射流的卷吸作用下,引射流体与之混合并发生动量交换,高速射流速度降低,引射流体速度增加。形成的混合流体经混合室后速度逐渐降低。通过图 6 可以看出,引射器中间对称截面的速度分布是非对称的,相应地计算出引射器轴线上的压力、速度变化。

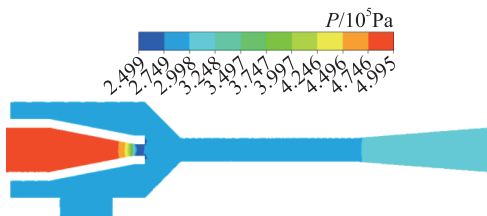


图 5 引射器中间对称截面压力云图
Fig.5 Pressure cloud diagram of symmetrical section of ejector

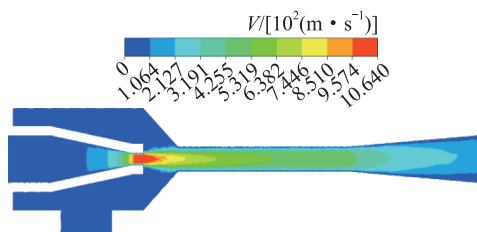


图 6 引射器中间对称截面速度云图
Fig.6 Velocity cloud diagram of symmetrical section of ejector

图 7 为轴线上压力、速度分布曲线,引射器中气流流速在喷嘴处迅速达到峰值,之后随着距离的增加逐步下降,且在开口尺寸变化处存在一个拐点。相应地,工作流体压力在通过内部收敛喷嘴时压力骤降,出口附近压力值降至最低,在低压高速工作流体卷吸流动的作用下引射流体进入混合管,混合过程中压力缓慢上升,在扩散管减速增压的作用下,压力值最终恢复。

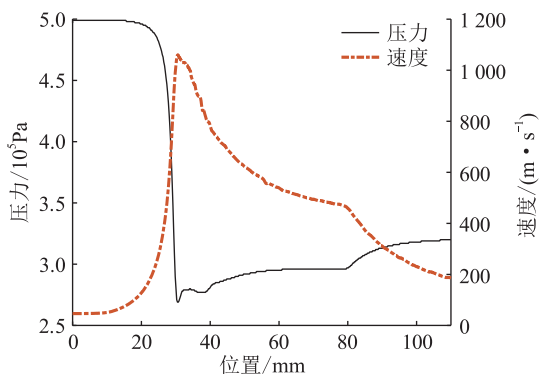


图 7 引射器轴线压力和速度分布曲线
Fig.7 Pressure and velocity distribution curves at the ejector axis

3.2 影响因素分析

引射器的结构参数对于流体特性有显著影响,

进而产生不同的引射效果。以引射系数为评价指标,基于 CFD 模型进一步研究不同压力工况下引射特性的影响规律。

3.2.1 引射流体入口直径

引射流体入口压力 p_h 分别取 2.57×10^5 Pa, 2.77×10^5 Pa, 2.97×10^5 Pa 3 种工况进行分析,入口直径 d_h 等间隔选取 6 个参考点,基于 3 种压力优化仿真以保证不同工况下结果的普遍性,仿真结果见图 8。

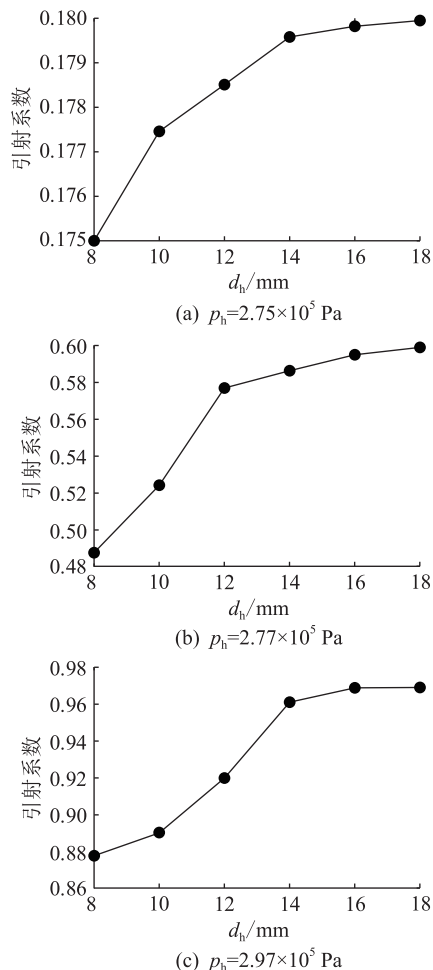


图 8 引射系数随引射流体入口直径变化曲线
Fig.8 Variation curve of ejection coefficient with ejection fluid inlet diameter

可以看出,不同工况下曲线具有相同的变化趋势,引射系数 μ 随引射流体入口直径 d_h 的增加单调增加,但变化率逐渐降低,最终趋于平稳。随着 d_h 的增加,引射流体的吸入阻力变小,一定质量流量的工作流体可以吸入更多引射流体,并且入口尺寸的增加为引射过程提供足够的流体供应,引射系数相应增加。由于结构与流量的限制, d_h 增加到一定程度后不再引起引射性能的变化。此外,对比 3 条曲线可以看出,引射流体入口压力 p_h 对引射性能有很大影响, μ 随着 p_h 增加而提高。由于压力的增

加,入口与收敛喷嘴出口之间压差变大,工作流体通过剪切作用实现对更多量引射流体的卷吸,引射流体质量流量 G_H 增加,引射系数提高。

3.2.2 工作流体入口直径

工作流体入口直径 d_p 的变化会引起工作流体质量流量 G_p 的变化,进而影响引射性能。探究入口直径与引射系数的关系时,引射流体入口压力和混合流体出口压力保持设计工况不变,工作流体入口直径作单一变量,在 6~14 mm 范围取 5 个参考点仿真,3 种工况下的分析结果如图 9 所示。可以看出,不同压力工况下的响应曲线都呈现先增后减的趋势,工作流体入口直径存在一个临界值。

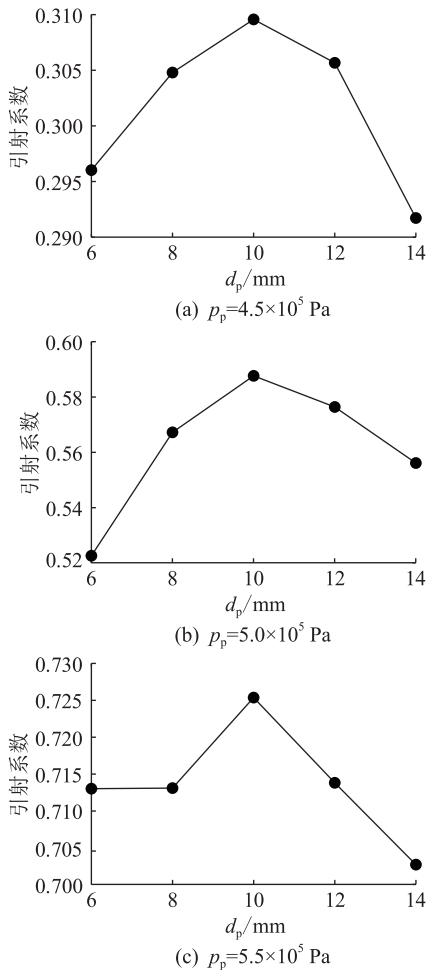


图 9 引射系数随工作流体入口直径变化曲线

Fig.9 Variation curve of ejection coefficient with working fluid inlet diameter

3.2.3 混合流体出口直径

最后对混合流体出口直径 d_c 进行仿真研究。工作流体入口压力 p_p 和引射流体入口压力 p_h 保持工况值,分别在混合流体出口压力 p_c 为 2.8×10^5 Pa, 3.0×10^5 Pa, 3.2×10^5 Pa 的 3 种工况下进行仿真对比。混合流体出口直径 d_c 为单一变量,在 8~18 mm

范围内取 6 个采样点,仿真结果如图 10 所示。可以看出,不同出口压力工况下,引射系数均随 d_c 的增加先单调增加,达到某一临界值后开始减小,在 3.0×10^5 Pa 和 3.2×10^5 Pa 时, d_c 达到临界后引射性能下降速率迅速增加。随着混合流体出口压力的增加,引射器背压增加,阻碍了流体流出,引射系数减小,但引射系数对出口直径变化的敏感度降低,引射器工作性能的稳定性得到提高。

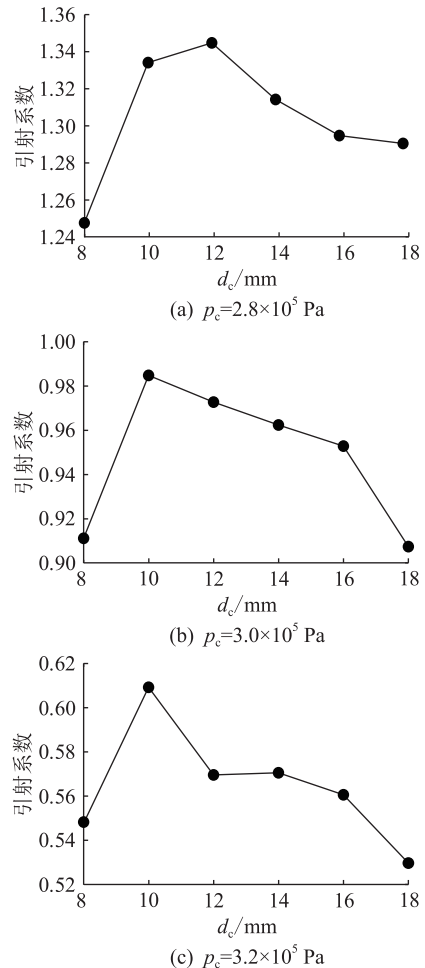


图 10 引射系数随混合流体出口直径变化曲线

Fig.10 Variation curve of ejection coefficient with the diameter of the mixed fluid outlet

3.3 引射效果分析

由上述分析结果可知,引射流体入口直径的增加可以提升引射性能,但存在一个拐点,在该拐点之后,提升效果不再明显;而工作流体入口直径与混合流体出口直径的影响则均存在一个峰值点,随着尺寸的持续增加,引射系数在到达峰值点之后开始迅速降低。根据上述分析结果对引射器结构参数进行优化,在各部分结构不发生干涉的前提下依次调整引射流体入口直径、工作流体入口直径和混合流体出口直径,使引射性能达到最优。优化后的结构参数对引射效果的计算如表 4 所示,可以看出,

优化后引射流量提升了 15.25%，引射系数提高了 13.55%，改善了相同条件下未反应氢气的循环利用效率。

表 4 优化前后引射效果对比
Table 4 Comparison of injection effect before and after optimization

参数名称	优化前	优化后
工作流体流量/(g·s ⁻¹)	1.726	1.754
引射流体流量/(g·s ⁻¹)	0.905	1.043
引射系数	0.524	0.595

4 结论

文中针对电动汽车 PEMFC 氢气循环系统进行了引射器工作特性研究与建模,基于计算流体力学仿真探究了引射器内部流场特性,揭示了不同压力工况下引射流体入口直径、工作流体入口直径及混合流体出口直径对引射系数的影响规律,得到以下结论。

(1) 引射系数与引射流体入口直径呈正相关,但随着入口直径的增加,引射系数的提升量逐渐降低且在入口直径 14 mm 附近存在拐点;

(2) 工作流体入口与混合流体出口参数对引射系数的影响存在一个峰值点,在峰值前后均呈现先增后减趋势;

(3) 通过优化,引射流量提升了 15.25%,引射系数提高了 13.55%。可见,在相同条件下未反应氢气的循环利用率得到了显著改善。

参考文献:

[1] CHEN H J, ZHU J H, GE J, et al. A cylindrical mixing chamber ejector analysis model to predict the optimal nozzle exit position [J]. *Energy*, 2020, 208: 118302.

[2] 李琳玮, 宁光涛, 俞悦, 等. 基于交通信息的多类型电动汽车综合充电需求研究[J]. *电力工程技术*, 2020, 39(1): 191-199.

LI Linwei, NING Guangtao, YU Yue, et al. Comprehensive charging demand of multi-type electric vehicles based on traffic information[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2020, 39(1): 191-199.

[3] 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.

[4] SHARMA S, POLLET B G. Support materials for PEMFC and DMFC electrocatalysts-a review[J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 208: 96-119.

[5] KARNIK A Y, SUN J, BUCKLAND J H. Control analysis of an ejector based fuel cell anode recirculation system[C]//2006 American Control Conference. Minneapolis, MN, USA. IEEE,

2006:484-489.

[6] VINCENZO L, MADDS P, SØREN K. Ejector design and performance evaluation for recirculation of anode gas in a micro combined heat and power systems based on solid oxide fuel cell[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 54(1): 26-34.

[7] 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.

[8] 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 Zequn, XU Sichuan, ZHANG Daobiao, et al. Development and prospect of hydrogen supply system in vehicle PEMFC[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2016, 40(8): 1726-1730.

[9] SIERENS R, VERHELST S. Influence of the injection parameters on the efficiency and power output of a hydrogen fueled engine[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2003, 125(2): 444-449.

[10] HE H W, QUAN S W, WANG Y X. Hydrogen circulation system model predictive control for polymer electrolyte membrane fuel cell-based electric vehicle application [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(39): 20382-20390.

[11] QIN B, WANG X L, WANG L, et al. Hydrogen excess ratio control of ejector-based hydrogen recirculation PEM fuel cell system[C]//2019 34th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC). Jinzhou, China. IEEE, 2019: 648-653.

[12] CHOI E J, YU S, KIM J M, et al. Model-based system performance analysis of a solid oxide fuel cell system with anode off-gas recirculation[J]. *Energies*, 2021, 14(12): 3607.

[13] FENG J M, XING L F, WANG B Q, et al. Effects of working fluids on the performance of a roots pump for hydrogen recirculation in a PEM fuel cell system[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(22): 8069.

[14] LEE J H, SAMEEN A, KUMAR V S, et al. Studies on ejector systems for hydrogen fuel cell[C]//41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Tucson, Arizona. Reston, Virginia: AIAA, 2005.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 杨秋香, 叶立, 殷园, 等. PEMFC 系统引射器设计及仿真研究[J]. *能源研究与信息*, 2018, 34(3): 176-181.

YANG Qiuxiang, YE Li, YIN Yuan, et al. Design and numerical simulation of ejector in the proton exchange membrane fuel cell system [J]. *Energy Research and Information*, 2018, 34

- (3):176-181.
- [18] BAI S F, WANG L, WANG X L. Optimization of ejector geometric parameters with hybrid artificial fish swarm algorithm for PEM fuel cell [C]//2017 Chinese Automation Congress (CAC). Jinan, China. IEEE, 2017; 3319-3322.
- [19] 李伦, 纪少波, 陈秋霖, 等. 一种流量可调的燃料电池用引射器的数值分析[J]. 内燃机与动力装置, 2019, 36(3): 30-36.
- LI Lun, JI Shaobo, CHEN Qiulin, et al. Numerical analysis of an ejector for fuel cell with adjustable flow rate[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2019, 36(3): 30-36.
- [20] 余亚东, 高慧, 肖晋宇, 等. 不同燃料路径氢燃料电池汽车全生命周期环境影响评价[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(3): 301-308.
- YU Yadong, GAO Hui, XIAO Jinyu, et al. Life-cycle assessment of environmental impact of hydrogen fuel cell vehicles with different fuel pathways[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(3): 301-308.
- [21] 张恒. 质子交换膜燃料电池氢气引射器设计及性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- ZHANG Heng. Design and characteristic research of hydrogen ejector for proton exchange membrane fuel cell[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [22] CHANPENG W, KHUNATORN Y, PLANGKLANG B. Model and experiment analysis of 1.2 kW PEMFC electrification[J]. Procedia Engineering, 2011, 8: 106-114.
- [23] 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, 1130.
- ZHOU Su, HU Zhe, WANG Kaikai, et al. Simulation analysis of cyclic characteristics of ejectors for PEMFC systems[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(8): 1115-1121, 1130.
- [24] 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.
- XU Sichuan, HAN Wenyan, WANG Gui, et al. Hydrogen-recirculating ejector for proton exchange membrane fuel cell system: design and performance[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(1): 128-134.

作者简介:



赵海贺

赵海贺(1996),男,硕士在读,研究方向为动力电池安全与管理(E-mail: zhaohh@stumail.neu.edu.cn);

陈泽宇(1982),男,博士,副教授,研究方向为新能源汽车与动力电池管理;

覃承富(1999),男,本科在读,研究方向为动力电池故障诊断。

Ejection characteristics of hydrogen cycle system for vehicular fuel cell

ZHAO Haihe, CHEN Zeyu, QIN Chengfu, GUO Xiaobing

(School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Fuel cell electric vehicles are an important development direction of new energy vehicles. As the core energy unit of the vehicle, fuel cell performance directly affects the economy, power and reliability of the vehicle. The ejector is an important functional element in the hydrogen circulation system of the fuel cell. Firstly, the ejector is designed and modeled based on the Sokolov design method. Then the flow field analysis of the ejector fluid is carried out. Finally, based on the analysis results, the key influencing factors of ejection performance are explored. The results show that under different pressure conditions, the ejection coefficient and the working fluid inlet diameter show a parabolic trend, and the ejection coefficient is positively correlated with the ejection fluid inlet diameter. The ejection coefficient first increases and then decreases with the increase of the mixed fluid outlet diameter. Based on the above-mentioned influence rules, the ejection coefficient is optimized, and the hydrogen return performance of the ejector is increased by 13.55%, which further improves the hydrogen utilization rate of the fuel cell, and further improves the ejector structure optimization and ejection characteristics research.

Keywords: new energy vehicles; fuel cell; hydrogen supply system; cycle characteristics; ejector; computational fluid dynamics

(编辑 钱悦)