

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107613

# 燃料电池氢循环喷射器性能分析与结构优化

张心悦<sup>1</sup>, 张海伦<sup>2</sup>, 王雷<sup>1</sup>

(1. 山东大学控制科学与工程学院 济南 250061; 2. 山东大学信息科学与工程学院 青岛 266237)

**摘要:**喷射器以其体积小、无运动部件、不产生寄生能耗等一系列优点,正成为氢燃料电池氢气再循环的理想解决方案。但电堆变工况下喷射器的循环流体与供给流体的高度耦合特性致使其与电堆的匹配和优化难度较大。本文针对燃料电池变负载工况下喷射器引射流体压力与背压耦合变化的情况,采用计算流体力学(CFD)流体力学计算和实验相结合的方法,获取多组不同NXP值和工况条件下喷射器内部压力场和速度场,探究变工况下NXP对喷射器性能的影响的演变规律。结果表明,一次流压力的提升有助于提升喷射器循环性能,压力为4 bar时,在NXP=-15.6 mm时,引射比达到峰值2.43。同时,本文基于研究结果,采用数值解析获得变工况喷射器最优NXP的判定方法,结果有助于宽工况下喷射器与电堆的匹配设计与优化。

**关键词:** 燃料电池; 喷射器; 变工况; 供氢循环; 计算流体力学

**中图分类号:** TH36 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470

## Performance analysis and structure optimization of ejector in PEMFC hydrogen cycle

Zhang Xinyue<sup>1</sup>, Zhang Hailun<sup>2</sup>, Wang Lei<sup>1</sup>

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao 266237, China)

**Abstract:** The ejector has advantages of small size, no moving parts, no parasitic energy consumption, etc. It is becoming an ideal solution for hydrogen recycling in hydrogen fuel cells. However, it is difficult to match and optimize the ejector with the stack due to the high coupling between the ejector's circulating fluid and the supply fluid. In this paper, the combination of computation fluid dynamic (CFD) calculation and experiment is used to obtain multiple sets of different nozzle exit position (NXP) and working conditions under the coupling change of ejector ejection fluid pressure and back pressure under fuel cell variable load conditions. The internal pressure field and velocity field of the ejector explore the evolution of the influence of the NXP variable operating conditions on the ejector performance. Results show that the increase of primary flow pressure is helpful to improve performance of the ejector. When the primary pressure is 4 bar, the ejection ratio reaches a peak of 2.43 when NXP is -15.6 mm. Meanwhile, based on the research results, this paper utilizes numerical analysis to achieve the optimal NXP judgment method of the ejector under variable working conditions, which is helpful to the matching design and optimization of the ejector and the stack under wide working conditions.

**Keywords:** proton exchange membrane fuel cells; ejector; variable condition; hydrogen recirculation; computation fluid dynamic

## 0 引言

氢燃料电池(proton exchange membrane fuel cells, PEMFC)直接将化学能转化为电能,不受卡诺循环的限制,具有能量转化效率高、不产生污染物、启动速度快、噪声低

等一系列突出优点<sup>[1-2]</sup>,成为世界各国研究的热点<sup>[3-6]</sup>。

氢燃料电池的阳极回路中氢气主要采用氢气循环供应系统<sup>[7-11]</sup>,主要包括机械循环泵和喷射泵两种方式<sup>[12-16]</sup>,相比于机械循环泵,喷射泵具有体积小、噪声小、不产生寄生能耗等优点<sup>[17-19]</sup>,引起了广泛的研究兴趣。

研究表明,喷射器的几何参数对于喷射器的引射性

能具有较大影响<sup>[14]</sup>。因此,通过优化喷射器几何结构参数以提升喷射器性能并获得更良好的工作区间正成为研究热点。国际上, Maghsoodi 等<sup>[20]</sup>采用神经网络及遗传算法研究了混合室长度、喷嘴到混合室距离 (nozzle exit position, NXP) 以及扩散室参数对喷射器性能的影响。在国内, Wang 等<sup>[16]</sup>通过采用不同的紊流模型研究了 80 kW 质子交换膜燃料电池中喷射器混合室参数与喷射器扩散角之间的关系。肖杨杨等<sup>[21]</sup>运用建立的初始几何模型模拟了 PEMFC 发动机系统氢气喷射器结构参数以及工作流体压力对引射系数的影响。经验证表明,在研究改变各种结构参数对喷射器影响的过程中, NXP 是影响喷射器引射性能的一个重要参数,并且存在最优值<sup>[17]</sup>。但以往的研究中并未考虑喷射器供给流与引射流的耦合情况,导致设计工况与燃料电池实际运行工况偏离较大,难以满足电堆复杂工况下的循环、供氢性能需求。

Nikiforo 等<sup>[22]</sup>已在研究中发现喷射器性能与燃料电池阳极压力及阳极压降密切相关,并提出了一种燃料电池阳极压降计算模型<sup>[23]</sup>。由此得到,在燃料电池工况下,喷射器引射流体决定于其供给流和电堆工况,尤其是电堆功率输出变化情况下,氢气消耗和流道压损时刻变化,致使喷射器引射性能波动。因此,在变工况下,考虑电堆反应效率和流道损失的情况下优化喷射器结构特性参数异常重要,且喷射器二次流与供给流的耦合特性更增加了研究的难度,通过查阅大量文献发现,上述问题几乎无人研究。针对上述问题,本文根据燃料电池阳极压降模型,对喷射器的工况参数进行判定,确定了燃料电池工况下喷射器边界条件,进而分析参数 NXP 的改变对喷射器内部流场及性能的影响,最后探究不同工作压力条件下最优 NXP 的变化情况,依此提出了一种变工况下确定最优 NXP 的方法,使得喷射器性能达到最优,提高燃料电池系统整体运行效率。

## 1 模型建立

### 1.1 燃料电池模型

图 1 所示为简化的燃料电池氢循环系统,主要由燃料电池电堆、喷射器、压力调节阀和储氢罐组成。喷射器出口连接燃料电池阳极氢气进口,而燃料电池阳极氢气再循环回路作为喷射器二次流。

### 1.2 喷射器模型

图 2 所示为喷射器结构示意图,主要由喷嘴、吸入室、混合室和扩压室组成,其中喷嘴到混合室的距离称之为 NXP。在燃料电池工作过程中,一次流(工作流)氢气通过喷嘴得到加速,同时压力急剧降低,通过剪切作用将二次流(引射流)吸入喷射器。两股流体在混合室中进

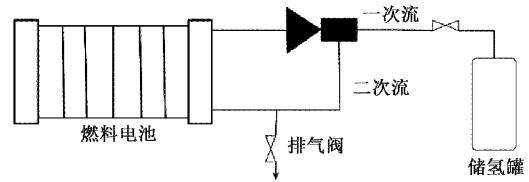


图 1 燃料电池系统

Fig. 1 PEMFC system

行混合,进入扩压室压力继续升高,混合流体(供给流)由喷射器出口喷出,进入燃料电池阳极氢气入口,实现对引射流体增压效果。如图 2 所示,当喷嘴逐渐远离混合室 NXP 为负,反之为正。现有研究表明,喷射器性能受多个结构参数影响较大。

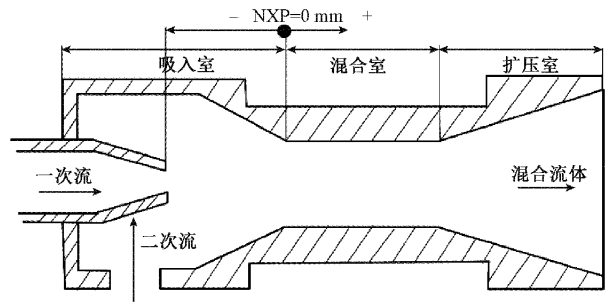


图 2 喷射器结构图

Fig. 2 Structure diagram of the ejector

本文采用 Gambit2.4.6 建立喷射器二维轴对称结构模型,将计算区域划分成了 7 块,逐块划分网格,如图 3 所示。最终得到的网格数量为 107 728 个,网格无关性验证中不同网格数量的模型网格无关解的变化稳定在 0.7% 以内,保证了计算的准确性,建立的喷射器模型的网格无关性验证如后文第 3 节所示。

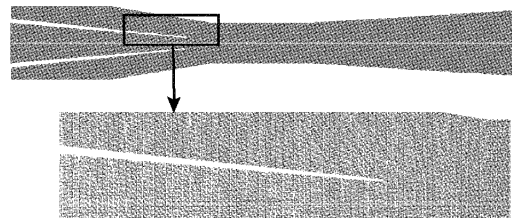


图 3 喷射器计算域和网格结构

Fig. 3 Calculation domain and the grids of the ejector

### 1.3 控制方程

由于燃料电池在稳定条件下运行,所以假设喷射器内部流体为稳定、湍流和可压缩流体。在忽略了蒸汽冷凝以及重力影响的条件下,根据牛顿流体流动守恒方程,建立了喷射器内部流动控制方程,即质量、动量、能量的

守恒方程,由如下偏微分式表示:

质量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

其中,  $u_i$  和  $\rho$  分别为第  $i$  个方向的速度和密度。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma}{\partial x_i} \quad (2)$$

其中,  $P$  和  $\sigma$  分别为压力和应力张量。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(u_i(\rho E + P))}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ k \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_i \sigma - \sum_j h_j J_j \right] \quad (3)$$

其中,

$$\Delta P = \frac{1.1748 \times 10^{-12} (C_w + C_d)^2 L e T^{275.7} \left( 9.55 \times 10^7 \frac{Q_H}{N} - 0.5I \right)}{n \left( (C_w + C_d)^3 p^{0.0263} (p - 0.000155 T^3 + 0.1348 T^2 - 39.157 T + 3799.3) \right)} \quad (6)$$

其中,  $C_w, C_d, L$  和  $n$  为燃料电池阳极通道几何参数;  $N$  为电池数量;  $T$  为燃料电池堆栈温度;  $P$  为燃料电池阳极入口压力;  $Q_H$  为氢气总流量;  $I$  为工作电流。

在燃料电池稳定运行时,燃料电池阳极压降数值等

$$P_s = P_c - \frac{1.1748 \times 10^{-12} (C_w + C_d)^2 L e T^{275.7} (\lambda_H - 0.5I)}{n \left( (C_w + C_d)^3 p^{0.0263} (p - 0.000155 T^3 + 0.1348 T^2 - 39.157 T + 3799.3) \right)} \quad (7)$$

其中,  $\lambda_H$  为氢气化学计量比。

为了模拟燃料电池阳极循环喷射器的内部流体流动过程,采用了组分运输模型进行仿真。一次流入口设置为压力入口边界条件,工质为常温下的干氢气,温度为 300 K。由于喷射器喉部面积为定值,一次流入口压力由燃料电池工况和喷射器结构参数决定:

$$m_p = 1.05 \times 10^{-8} NI \quad (8)$$

$$m_p = \frac{\chi p_p^* f_p^* p_p}{v_p^*} \quad (9)$$

其中,  $m_p$  为一次流质量流量;  $N$  为电池数量;  $I$  为燃料电池工作电流;  $\chi$  为比热比;  $f_p^*$  为喷射器喉部面积; 喉部相对压力  $p_p^*$  和临界速度  $v_p^*$  计算如下:

$$p_p^* = \left( \frac{2}{\chi + 1} \right)^{\frac{\chi}{\chi - 1}} \quad (10)$$

$$v_p^* = \sqrt{\frac{2\chi R T_p}{\chi + 1}} \quad (11)$$

其中,  $R$  为气体常数;  $T_p$  为临界温度。

同样的,二次流入口也设置为压力入口边燃料电池工作界条件,工质为氢气和水蒸气的混合物,具体压力数值通过式(7)计算得出,由于温度对喷射器性能的影响

$$\sigma = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (4)$$

式中:  $E$  为总能量;  $k$  为有效导热系数;  $h_i, J_i$  分别是焓和扩散量;  $\delta_{ij}$  为克罗内克符号。

#### 1.4 边界条件确定

燃料电池工况下的喷射器性能与燃料电池的工况密切相关。研究发现燃料电池阳极压降问题是影响喷射器性能的重要因素之一<sup>[16]</sup>。Pei 等<sup>[23]</sup> 在研究中给出了计算阳极压降 ( $\Delta P$ ) 具体数值的公式:

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_d \quad (5)$$

其中,  $\Delta P_f$  为摩擦压降;  $\Delta P_d$  为离散压降。

通过实验结果与计算数据的对比发现,离散压降明显小于摩擦压降,即阳极压降约等于摩擦压降:

于喷射器出口压力和二次流入口压力的差值。本文在计算中忽略了阳极通道内液态水的堆积,考虑流体流动为单相流,最终得到喷射器出口压力 ( $P_c$ ) 与二次流入口压力 ( $P_s$ ) 之间的关系为:

非常小,几乎可以忽略不计,并且有学者在研究中发现,保持燃料电池堆栈温度和湿度在定值时进行对喷射器进行数值模拟与实际实验得出的结果相差非常小,几乎所有测试点相对误差都在 10% 以内,几乎可以忽略不计<sup>[17]</sup>,故本文在研究中将温湿度设置为定值。相对湿度为 90%,经计算可得其中氢气的质量分数约为 24.1%。为了更精确的模拟燃料电池工况,将二次流温度设置在 334.15 K,等同于燃料电池阳极出口温度。喷射器出口设置为压力出口边界条件压力与燃料电池阳极入口保持一致,温度为 343.15 K,分别模拟了燃料电池阳极入口压力为 1.1、1.2、1.4、1.6 bar 时的工况,结合本文中采用的燃料电池参数,最终得出具体边界条件参数设置如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,当燃料电池阳极进口压力,即喷射器背压设置为 1.1 bar 时,随着功率提升,一次流压力增大,同时阳极压降增大,当一次流压力等于 4.3 bar 时,二次流压力小于大气压,可能导致燃料电池工作过程中外部空气倒流,使得燃料电池工作效率大大降低。由此可见,可以适当提高燃料电池阳极进口压力,从而获得更高的工作效率同时避免气体回流。但过高或者变化范围过大的阳极进口压力可能导致燃料电池质子交换膜的破

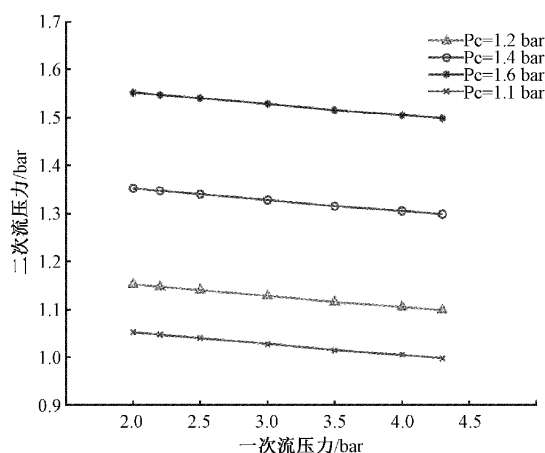


图4 边界条件设置

Fig. 4 Settings of boundary condition

损。因此,考虑到在本文中一次流压力变化在2~4.3 bar,后文的仿真实验中分别模拟了燃料电池阳极进口压力(即喷射器背压)为1.2、1.4、1.6 bar时,喷射器的性能参数。这样一来,即保证了燃料电池的正常运行,防止气体回流,同时也防止了质子交换膜损坏的情况发生。

### 1.5 数值方法

在数值研究中,网格的建立直接影响了流体力学分析结果的准确度。Pianthong等<sup>[24]</sup>在研究中发现采用二维模型与三维模型对喷射器进行求解时,结果几乎没有差别。本文为了研究燃料电池工况下喷射器的特性和内部流体流动特性,采用了Gambit2.4.6软件建立了喷射器二维轴对称模型,并采用fluent16.0软件作为计算流体力学(computation fluid dynamic, CFD)求解器对建立的喷射器模型进行求解。初步建立喷射器模型网格数为75 625,逐步加密,由于需要同时保证结果的准确性和计算效率,最终采用的模型网格数约在100 000~120 000,网格无关性验证如后文所示。

经试验实验证明,在燃料电池工况下,采用几种不同的湍流模型时,喷射器引射比和背压等参数拥有不同的相对误差,证明且湍流模型k-RNG模型的精度明显高于k-sst等湍流模型<sup>[10]</sup>,在仿真过程中提供了非常高的精度。因此,本文选择k-RNG模型模拟喷射器内部复杂的流体流动。将喷射器内部流体混合过程视为理想绝热过程,由于混合过程较为迅速,忽略了通过喷射器壁面的传热,采用无滑移绝热壁面边界条件。采用SIMPLEC算法求解压力场,采用二阶迎风格式对压力、密度、组分运输进行离散化,动量、湍流动能、耗散率以及能量采用一阶迎风格式进行离散化。

采用基于压力的求解方法对质量、动量以及能量控制方程进行迭代求解。仿真收敛条件设为:所有方程的

两次迭代值的残差小于 $10^{-6}$ ;满足质量守恒定律,即一次流与二次流的质量流量之和与喷射器出口质量流量之差的绝对值小于 $10^{-7}$  kg/s。

## 2 模型验证

为了保证结果的准确性与可靠性,本文进行了网格无关性验证。从疏到密建立了4组不同网格数量的喷射器模型进行仿真验证。其中4组模型的网格数分别为107 728,140 860,167 602和231 762个网格。本次网格无关性验证中工作流体为干氢气,喷射器一次流入口压力为5 bar,二次流入口压力为1.4 bar,出口压力为1.6 bar。得到的轴向压力分布图如图5所示,一次流通过喷嘴得到加速,同时压力急剧降低,通过剪切作用将二次流吸入喷射器。两股流体在混合室中进行混合,进行混合并交换其动量和动能。混合流体离开喷射器的收敛部分后,到达恒定面积的喉部,在此处压力骤增,并且由于形成了激波,流动变得亚音速。之后,流体进入扩压室部分,在这一部分,混合流体的动能转化为压力势能。最终,混合流体达到设计出口压力,再经由喷射器出口喷出。可以看出由4组模型得出的结果基本一致。由4组模型得到的喷射器进、出口质量流量、引射比以及相对误差如表1所示,其中 $m_e$ 和 $m_p$ 分别为引射流体和工作流体的质量流量。可以看出最大误差控制在0.7%以内。为了同时保证结果的准确性以及较高的计算效率,本文最终选择了107 728网格数的喷射器模型进行仿真实验。

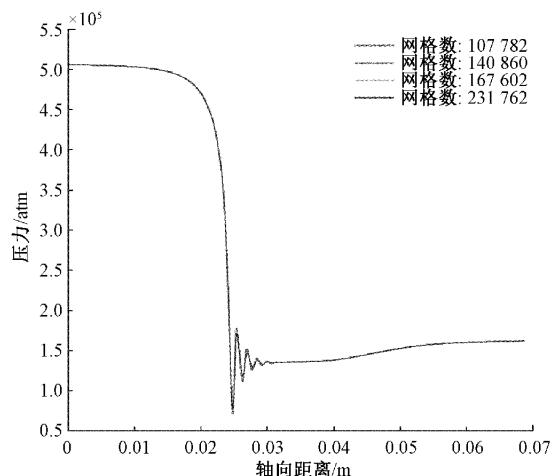


图5 不同网格数喷射器轴向压力

Fig. 5 Distribution of pressure along ejector centerline with different grid levels

为了充分验证所建模型的准确性,采用文献[17]中具有相似几何形状和工况的喷射器进行模型验证,在



表1 不同网格数下喷射器性能参数  
Table 1 Performance of ejector under different mesh number

网格数	$m_p$ /(g·s <sup>-1</sup> )	$m_p$ 相 对误差 /%	$m_e$ /(g·s <sup>-1</sup> )	$m_e$ 相 对误差 /%	引射比	引射比 相对误差 /%
107 782	0.668 5	-	1.180 5	-	1.766	-
140 860	0.667 0	-0.22	1.176 0	-0.38	1.763	-0.17
167 602	0.666 0	-0.37	1.181 2	0.05	1.774	0.45
231 762	0.665 1	-0.37	1.182 6	0.18	1.778	-0.68

相同的仿真条件下采用所建立的模型进行验证,结果如图6所示。从图6中可以看出,该模型模拟结果与文献结果吻合较好,表明所建立的CFD模型预测引射器性能的准确性较好。

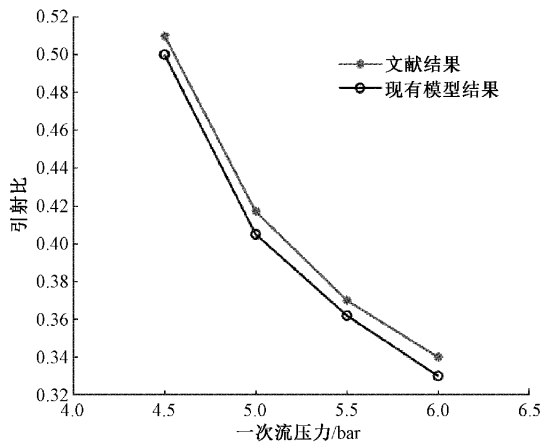


图6 模型验证  
Fig. 6 Model evaluation

### 3 结果分析

#### 3.1 变工况喷射器性能分析

在喷射器研究中,引射比是评估喷射器性能的最重要的指标,其直接反映工作流体抽吸引射流体的能力。通过分析引射比的变化来寻找喷射器性能最优点。可以由式(12)计算引射比:

$$\mu = \frac{m_e}{m_p} \tag{12}$$

其中,  $m_e$  和  $m_p$  分别为引射流体和工作流体的质量流量。

通过仿真实验,模拟了喷射器  $NXP = -12.5$  mm 时,引射比随一次流压力和背压的变化情况如图7所示。

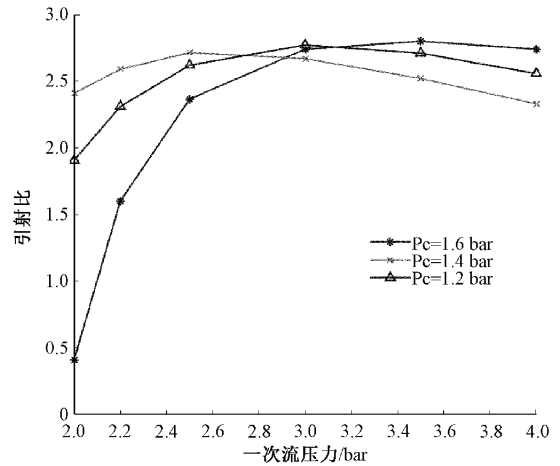


图7 不同背压下引射比随一次流压力变化规律  
Fig. 7 The entertainment ratio varies with primary flow pressure under different back pressure

可以看出,当背压为1.2 bar时,随着一次流压力升高,引射比不断上升。如图8、9所示,这是由于随着一次流压力的上升,喷嘴出口流体速度不断增大,最终达到超音速,在喷在出口形成低压区,使得吸引二次流体能力上升。当一次流压力达到2.5 bar时,喷射器性能达到最高。随着一次流压力继续升高,引射比下降,这是由于过高的一次流压力使得流体在喷嘴出口处无法形成低压,使得喷射器性能下降。并且从图中可以明显看出,背压升高时,对应的最优一次流压力随之升高,并且在一定背压条件下对应的最优一次流压力与背压成线性关系:

$$p_p^* = kp_c + b \tag{13}$$

其中,  $p_p^*$  为最优一次流压力;  $p_c$  为背压;  $k$ 、 $b$  为常数系数。应用在本文的喷射其中,可以得出  $k = 2.5$ ,  $b = -0.5$ 。

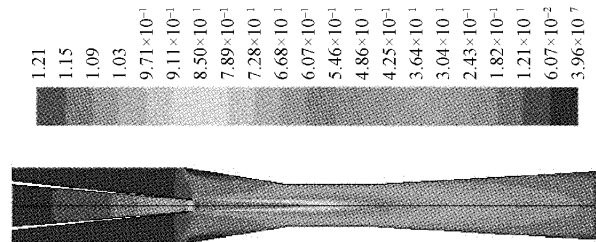


图8 一次流为2.5 bar,背压为1.2 bar时喷射器内部速度云图(马赫数)  
Fig. 8 Contours of the internal velocity of the ejector with 1.2 bar back pressure and 2.5 bar primary pressure (Mach number)

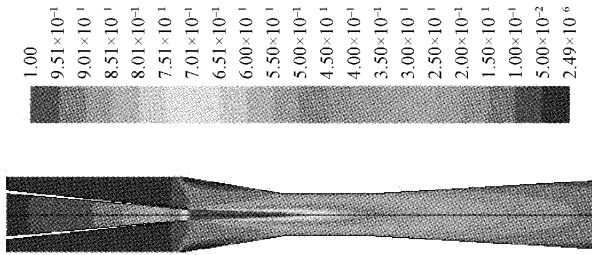


图 9 一次流为 2.5 bar,背压为 1.4 bar 时喷射器内部速度云图(马赫数)

Fig. 9 Contours of the internal velocity of the ejector with 1.4 bar back pressure and 2.5 bar primary pressure (Mach number)

### 3.2 最优 NXP

引射比是评估喷射器性能的最重要的指标,其直接反映工作流体抽吸引射流体的能力。最优 NXP 为喷射器引射比达到最高时的 NXP 值,本文通过分析引射比的变化来寻找喷射器性能最优点。为了寻找 NXP 的最优值,在背压分别为 1.2、1.4、1.6 bar,一次流压力变化在 2~4 bar 时,改变 NXP,观察引射比的变化。喷射器初始 NXP 为 -6 mm,随着喷嘴不断外移至 NXP = -16 mm,得到 NXP 与一次流压力变化条件下引射比的变化规律分别如图 10、11、12 所示。

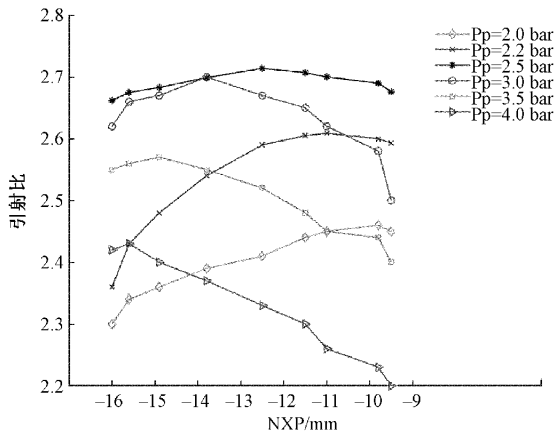


图 10 背压为 1.2 bar 时引射比随 NXP 和一次流压力变化规律

Fig. 10 The ejection ratio varies with primary flow pressure and NXP with 1.2 bar back pressure

由图 10 中可看出,工作流体压力为 2 bar 时,随着喷嘴逐渐远离混合室,引射比上升,这是由于流体在喷嘴出口附近工作流体速度已达到超音速,通过剪切作用将引射流体吸入,形成混合边界层。进入混合室后,两股流体速度渐渐趋于一致。随着喷嘴逐渐远离混合室,引射流

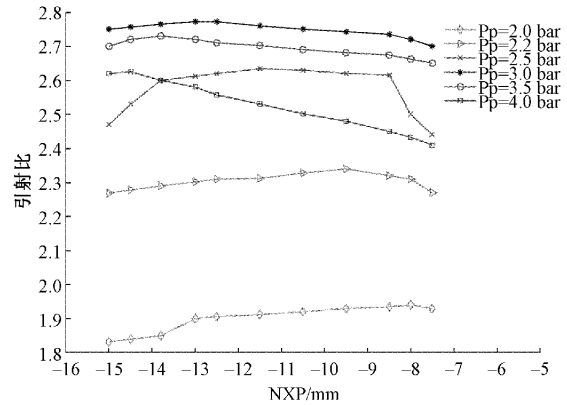


图 11 背压为 1.4 bar 时引射比随 NXP 和一次流压力变化规律

Fig. 11 The ejection ratio varies with primary flow pressure and NXP with 1.4 bar back pressure

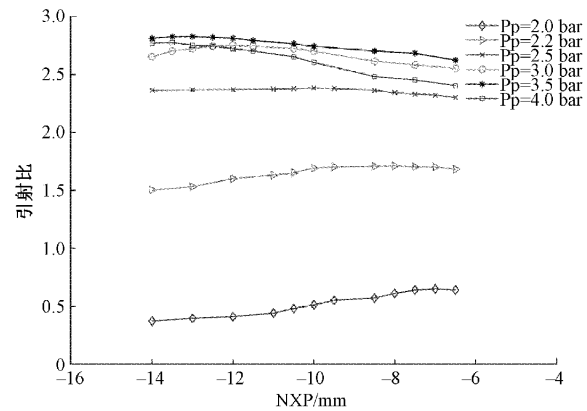


图 12 背压为 1.6 bar 时引射比随 NXP 和一次流压力变化规律

Fig. 12 The ejection ratio varies with primary flow pressure and NXP with 1.6 bar back pressure

体平均速度逐渐上升,直到达到最优 NXP 值 -9.8 mm,这是由于获得了相对较长的加速时间,对应引射比达到峰值,为 2.46。随着喷嘴距继续增大,引射比下降,这是由于喷嘴不断向外移动,由于吸入室和混合段流动过程中摩擦和动能损失,流体平均速度下降,从而导致混合段壁面压力增大,即壁面对流体反作用力决定的冲量增大,流体损失的动量、速度增大,导致引射比下降。可以看出,随着一次流压力的升高,对应的最优 NXP 也随之不断负增长。最终当一次流压力为 4 bar 时,随着喷嘴远离混合室,引射比不断上升,在 NXP = -15.6 mm 时达到峰值为 2.43,约上升了 10.45%。同样的,背压为 1.4 bar、1.6 bar 时,对应的最佳 NXP 分别同样随着一次流压力的增大负增长。因此,最优 NXP 意味着二次流得到一次流的充分加速,并且使得摩擦和动能损失保持在较低的值。

最终得到不同背压条件下最优 NXP 与一次流压力的对应关系如图 13 所示。

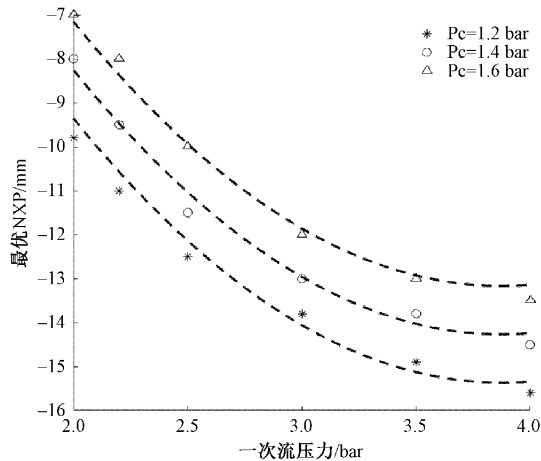


图 13 最优 NXP 随一次流压力和背压变化规律  
Fig. 13 The optimum NXP varies with primary flow pressure back pressure

从图 13 中可以清楚地看出,随着一次流压力升高和背压的减小,最优 NXP 负增长,即喷嘴位置须向远离混合室的方向移动,才能达到喷射器性能最优点。

可以利用二次函数拟合喷射器最优 NXP 与一次流压力以及背压之间的关系,因此,本文提出了在燃料电池稳定运行的工况下,通过不同一次流压力和背压情况最优 NXP 判定模型为:

$$NXP^* = 1.71p_p^2 - 13.25p_p + mp_c + n \quad (14)$$

其中,  $NXP^*$  为喷射器最优 NXP;  $p_p$  为一次流压力;  $p_c$  为背压;  $m$ 、 $n$  为常数系数。将这一确定喷射器最优 NXP 值的方法,应用在本文的喷射器中,经过仿真实验,得出参数  $m$  和  $n$  分别为 7.5 和 0.9。

## 4 结 论

本文针对燃料电池工况下,二次流与供给流耦合变化的情况,根据燃料电池阳极压降模型,判定燃料电池工况参数,设置燃料电池喷射器适用的边界条件,分析改变 NXP 以及工作压力对喷射器引射性能的影响,研究结果表明:

1) 气体回流影响燃料电池正常工作,为避免上述情况,可适当提高燃料电池阳极进口压力。在本文的仿真实验中,当一次流压力变化在 2~4.3 bar 时,燃料电池阳极进口压力(即喷射器背压)设置在 1.2~1.6 bar 时喷射器正常工作并获得较高的引射性能,同时避免了阳极压力变化过大引起的燃料电池质子交换膜损坏,可作为燃

料电池喷射器工况设计参考。

2) 在燃料电池工况下,背压升高时,对应的最优一次流压力随之升高,并且在一定背压条件下对应的最优一次流压力与背压成线性关系。

3) 通过研究不同工作压力对于最优喷射器结构的影响,提出了一种适用于燃料电池工况下确定最优 NXP 的方法,有助于在设计喷射器时选择适当的结构参数,提高模型精确度。

## 参考文献

- [1] 高大威,金振华,卢青春. 基于 Matlab 的燃料电池汽车动力系统仿真[J]. 系统仿真学报, 2005(8): 1899-1901.  
GAO D W, JIN ZH H, LU Q CH. Simulation of fuel cell vehical power train based on Matlab [J]. Journal of System Simulation, 2005(8): 1899-1901.
- [2] ZHANG G, JIAO K. Multi-phase models for water and thermal management of proton exchange membrane fuel cell: A review [J]. Journal of Power Sources, 2018, 391(Jul 1): 120-133.
- [3] 刘祥荣,蒋宇,张雪霞,等. 质子交换膜燃料电池三维数值仿真研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016: 1-26.  
LIU X R, JIANG Y, ZHANG X X, et al. Three-dimensional numerical simulation of proton exchange membrane fuel cell—A review [J]. Proceedings of The Chinese Society for Electrical Engineering, 2016: 1-26.
- [4] RODODIK S, POIROT-CROUVIZIER J P, BULTELL, et al. Impact of humidification by cathode exhaust gases recirculation on a PEMFC system for automotive applications [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44: 12802-12817.
- [5] 赵权,聂巍,高波,等. 燃料电池氢喷射器控制技术研究[J]. 船电技术, 2020, 40(4): 35-38.  
ZHAO Q, NIE W, GAO B, et al. Study on control technology for the hydrogen ejector of fuel cell [J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2020, 40(4): 35-38.
- [6] 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 AO, 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.

- [7] CHEN H, SONG Z, ZHAO X, et al. A review of durability test protocols of the proton exchange membrane fuel cells for vehicle[J]. *Applied Energy*, 2018; 89-99.
- [8] SASMLIB A P, MUJUMDER A S. Performance evaluation of a polymer electrolyte fuel cell with a dead-end anode: A computational fluid dynamic study [J]. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2011, 36: 10917-10933.
- [9] LIU J, WANG L, JIA L, et al. The influence of the area ratio on ejector efficiencies in the MED-TVC desalination system[J]. *Desalination*, 2017, 413: 168-175.
- [10] 马秋玉, 王宇鹏, 都京, 等. 燃料电池发动机氢气循环设计方案综述[J]. *汽车文摘*, 2019(4): 11-14.  
MA Q Y, WANG Y P, DU J, et al. Research on the hydrogen circulation system of fuel cell[J]. *Automotive Digest*, 2019(4): 11-14.
- [11] LIU J W, LI Q, CHEN W R, et al. A discrete hidden Markov model fault diagnosis strategy based on K-means clustering dedicated to PEM fuel cell systems of tramways[J]. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2018, 43: 12428-12441.
- [12] 薛浩渊. 两种新型跨音速喷射器研制及应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.  
XUE H Y. Development an application analysis on two types of novel transonic ejector [D]. Ji'nan: Shandong University, 2020.
- [13] LI Q, WANG T H, DAI C H, et al. Power management strategy based on adaptive droop control for a fuel cell-battery-supercapacitor hybrid tramway [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67: 5658-5670.
- [14] WAN Y, GUAN J P, XU S C. Improved empirical parameters design method for centrifugal compressor in PEM fuel cell vehicle application[J]. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2017, 42: 5590-5605.
- [15] DENG H W, LI Q, CHEN W R, et al. High-order sliding mode observer based OER control for PEM fuel cell air-feed system[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2018, 33: 232-244.
- [16] WANG X, XU S C, XING CH 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.
- [17] ZHU Y H, CAI W J, WEN CH Y, et al. Numerical investigation of geometry parameters for design of high performance ejectors[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(5-6): 898-905.
- [18] 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]. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2014, 39: 12061-12073.
- [19] 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.
- [20] MAGHSOODI A, AFSHARI E, AHAMADIKIA 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: 410-418.
- [21] 肖杨杨, 叶立, 杨秋香, 等. PEMFC 发动机系统氢气喷射器流场模拟及性能分析[J]. *能源工程*, 2016, (6): 27-33+38.  
XIAO Y Y, YE L, YANG Q X, et al. Hydrogen ejector flow field simulation and performance analysis on PEMFC engine system [J]. *Energy Engineering*, 2016, (6): 27-33+38.
- [22] NIKIFOROW K, KOSKI P, KARIMAKI H, et al. Designing a hydrogen gas ejector for 5 kW stationary PEMFC system e CFD-modeling and experimental validation[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41: 14952-14970.
- [23] PEI P C, OUYANG M G, FENG W, et al. Hydrogen pressure drop characteristics in a fuel cell stack [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2006, 31: 371-377.
- [24] PIATHONG K, SEEHANAM W, BEHNIA M, et al. Investigation and improvement of ejector refrigeration system using computational fluid dynamics technique[J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48 (9): 2556-2564.



## 作者简介



**张心悦**, 2018 年于山东大学(威海)获得学士学位, 现为山东大学控制科学与工程学院研究生, 主要研究方向为燃料电池与喷射理论。

E-mail: 656443548@qq.com

**Zhang Xinyue** received her B. Sc. degree from Shandong University (Weihai) in 2018. She is currently a master student in the School of Control Science and Engineering at Shandong University. Her research direction is fuel cell and jet theory.



**张海伦**(通信作者), 2011 年于齐鲁工业大学获得学士学位, 2014 年于齐鲁工业大学获得硕士学位, 2018 年于山东大学获得博士学位, 现为山东大学博士后, 主要研究方向为喷射理论与燃料电池系统控制。

E-mail: zhl\_sdu@163.com

**Zhang Hailun** (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Qilu University of Technology in 2011 and 2014, and received his Ph. D. degree from Shandong

University in 2018. He is currently a postdoctoral scholar at Shandong University. His main research interests include jet theory and PEMFC system control.



**王雷**, 1993 年于山东工业大学获得学士学位, 2000 年于山东大学获得硕士学位, 2004 年于浙江大学获得博士学位, 现为山东大学教授, 主要研究方向为现代检测技术、多相流检测、低品位能源利用中的控制

问题。

E-mail: leiwang@sdu.edu.cn

**Wang Lei** received his B. Sc. degree from Shandong Polytechnic University in 1993, received his M. Sc. degree from Shandong University in 2000, and received his Ph. D. degree from Zhejiang University in 2004. He is currently a professor at Shandong University. His main research interests include modern detection technology, multiphase flow detection and the control problems in low-grade energy resource utilization.