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

文/程友良　张　盼　朱熔宇
华北电力大学动力工程系

摘要：为提高质子交换膜燃料电池（PEMFC）系统氢气利用率，本文提出新型二段式喷嘴氢气引射器，建立三维CFD模型并探究了喷嘴结构参数和混合室直径对氢气利用率的影响规律，给出高氢气利用率PEMFC系统中引射器的优化结构设计建议。结果表明：新型引射器相较于传统引射器，对PEMFC系统氢气利用率的增益作用更明显，提升了5.68%。此外，第一级喷嘴出口直径对氢气利用率的影响不大，设计喷嘴时建议第一级喷嘴喉部直径略大于第二级，采用新型引射器可使系统氢气利用率达到93.5%。

关键词：PEMFC；二段式喷嘴引射器；喷嘴结构；氢气利用率；数值模拟

PEMFC凭借其零排放、高效率和易于模块化等众多优点，逐渐成为氢能的重要应用方式。但其受限于制氢和运氢成本高、加氢站普及程度低等因素影响，商业化进程缓慢；另外，现在国内自主研发的燃料电池车辆百公里氢耗相较国际更高。因此，提高氢燃料电池车辆的氢气利用率至关重要。如图1所示，传统Laval喷嘴引射器具有结构简单、成本低和无寄生功率等优点。

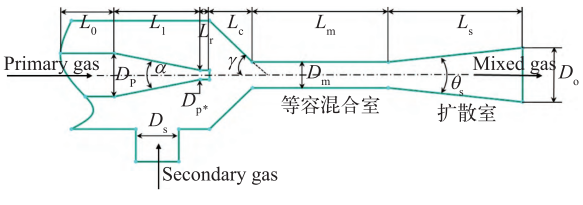


图1　传统Laval喷嘴引射器结构示意图

引射器性能的好坏决定着燃料电池系统氢气利用率的高低，对于带引射器的PEMFC系统，为进一步改善引射器的性能，提高PEMFC氢气利用率，目前不乏对引射器结构优化的研究。文献[1]对引射器的喷嘴直径、混合管长径、喷嘴出口位置NXP和扩散室长度等重要几何参数进行优化，获得更优的引射性能。文献[2]发现引射性能在扩散室角度为11°和13°时表现最佳。文献[3]发现增大喷嘴临界截面直径可以提高引射器性能。文献[4]发现引射性能与二次流管收敛角、倾斜角呈正比关系。与文献[4]的顺序优化方法不同的是，文献[5]运用人工神经网络和遗传算法对PEMFC中高性能引射器的4个重要结构参数进行优化，研究结果表明，选择合适的NXP可以提高引射性能。

以上研究只是针对引射器的固定工作条件，实际其工况是复杂多变的，容易受高噪声、动态变化以及操作条件偏差的影响[6]，很多学者设计出可以根据不同工况自行调节其结构的氢气引射器。例如文献[7-8]均在PEMFC系统中引入了可变几何引射器，文献[9-10]将针嵌入喷嘴中实现自调节，使干氢气在喷嘴中加速至超音速，进而提高引射器性

能。杜微微则是加入波纹管根据工作流体压力变化实现自调节，可以有效降低氢气浪费量。文献[11]针对130 kW PEMFC系统，将引射器二次流进口管设计成蜗壳式，结果表明引射器内部流体混合更均匀，并且引射性能得到提升。

然而，由于引射器对提高系统氢气利用率有着很重要的作用，截至目前对此方面的定量研究还不够，有待进一步探究；近几年，部分学者在制冷领域已不再局限采用传统的Laval喷嘴引射器[12]，而是提出双喉喷嘴结构，结果表明，引射器使制冷剂两相流流动更均匀，引射性能和制冷系统的循环效率得到提高[13-15]。本文借鉴双喉喷嘴建立二段式喷嘴氢气引射器以优化PEMFC系统氢气利用率，并基于其对氢气利用率的影响规律给出优化建议。

模型描述

1. 控制方程及引射器性能评价指标

控制方程见表1。

表1　控制方程

方程	表达式	
质量守恒	$\nabla\cdot(\rho v)=0$	(1)
动量守恒	$\nabla\cdot(\rho vv)=-\nabla P+\nabla\cdot(\tau)+\rho g$	(2)
能量守恒	$\nabla\cdot[v(\rho E+P)]=\nabla\cdot(\mu\nabla T-\sum_q h_q J_q+\tau v)$	(3)
组分传输	$\nabla\cdot(\rho v Y_q)=-\nabla J_q$	(4)

1）引射比[4]

$$\omega=\frac{m_s}{m_p} \tag{5}$$

式中，m_s代表一次流体的质量流率（g·s^{-1}）；m_p代表二次流体的质量流率（g·s^{-1}）。

2）燃料电池系统的氢气利用率

文献[16]建立了氢气利用率模型（HUC），并定义为

$$\eta_{H_2}=\frac{Q_{H_2,\,cons}}{Q_{all}}=\frac{Q_{H_2,\,cons}}{(Q_{H_2,\,loss}+Q_{H_2,\,cons})}=\frac{Q_{H_2,\,cons}}{(Q_{H_2}-Q_{H_2,\,re})} \tag{6}$$

$$Q_{H_2,\,cons}=\frac{P_{stack}}{2V_cF} \tag{7}$$

式中，η_{H_2}为PEMFC系统氢气利用率；$Q_{H_2,cons}$为电堆理论消耗量；Q_{all}为燃料电池系统总氢耗；$Q_{H_2,loss}$为电堆未利用的氢气量；$Q_{H_2,re}$为氢气再循环量；Q_{H_2}为电堆阳极氢气供应量，以氢气过量比1.9供应电堆；P_{stack}为PEMFC电堆功率；F为法拉第常数，取值为96 485.34 C·mol^{-1}；V_c为电堆单电池电压。对于一个80 kW的PEMFC电堆，单片电压为0.65 V时，计算得电堆氢气理论消耗量为1.38 g·s^{-1}。

2. 几何模型及网格划分

二段式喷嘴引射器结构参数见表2。根据表2参数建立二段式喷嘴氢气引射器几何模型，如图2所示，D_1和D_2分别为第一级喷嘴喉部和出口直径，D_3和D_4分别为第二级喷嘴喉部和出口直径，初始尺寸分别为1.9 mm、3 mm、1.7 mm和1.7 mm。考虑到需要讨论二段式喷嘴距NXP对系统氢气利用率的影响，故设计初始NXP=0 mm。

表2　二段式喷嘴引射器结构参数

尺寸参数	数值	尺寸参数	数值
初始喷嘴距NXP/mm	0	等容混合室直径/mm	5.8
第一级喷嘴喉部直径/mm	1.9	等容混合室长度/mm	46.4
第一级喷嘴出口直径/mm	3	等压混合室长度/mm	7.98
第二级喷嘴喉部直径/mm	1.7	扩散室长度/mm	63.8
第二级喷嘴出口直径/mm	1.7	扩散段扩散角度（°）	10
一次流体入口直径/mm	8	二次流体入口倾斜角（°）	0
二次流体入口直径/mm	12	二次流体入口收敛角（°）	0

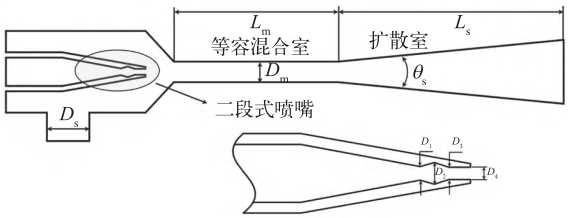


图2　二段式喷嘴氢气引射器结构图

本文利用ICEM绘制三维网格划分如图3所示。由于二段式喷嘴出口射流区域流动情况复杂且是本文重点关注对象，对其截面变化和一二次流体混合区域进行网格加密处理。网格质量检测Determinant数值均大于0.486，能够满足求解器的计算需求。

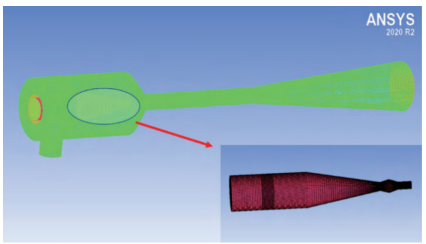
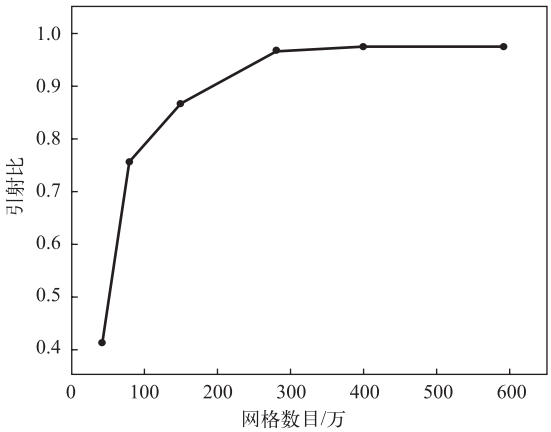


图3　二段式喷嘴氢气引射器三维网格划分

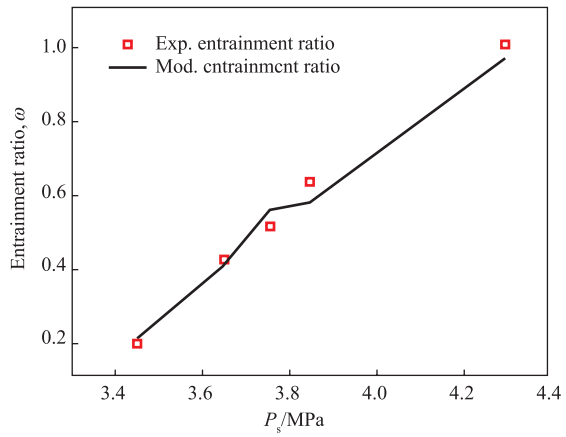
利用ICEM分别划分网格数为41万、80万、150万、278万、397万和589万六种网格来进行网格

独立性验证，由图4a可知，278万以后网格之间的差异可以忽略不计。因此，278万满足本研究的精度要求。

为验证二段式喷嘴氢气引射器仿真方法的准确性，建立与文献[17]相同尺寸的引射器，模拟不同P_s下，引射比的变化情况，并与实验数据[17]对比。其他操作条件为：P_p=9 MPa，P_c=4 MPa，T_p=308 K，T_s=285 K且工质为CO_2。实验与CFD对比结果如图4 b所示，模拟与实验引射比ω最大误差为8.76%，表明所用模拟方法精度满足要求。



(a) 网格无关性验证



(b) 模型验证

图4 验证曲线

结果与讨论

1. 二段式喷嘴引射器与传统引射器性能比较

二段式喷嘴氢气引射器与传统引射器性能进行比较，对比如图5所示，case1为传统Laval喷嘴引射器、case2为二段式喷嘴引射器。对比发现，采用二段式喷嘴引射器使系统氢气利用率提升了5.68%，达到85.14%。可见二段式喷嘴引射器较传统引射器能进一步提升PEMFC系统氢气利用率。

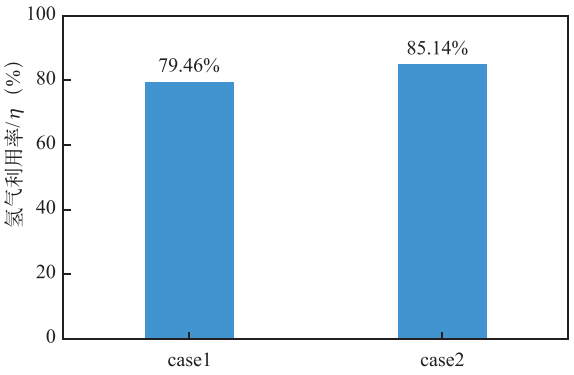


图5 引射器性能对比图

2. 二段式喷嘴结构参数对氢气利用率的影响

二段式喷嘴引射器相较于传统引射器最大特点就是喷嘴采用双喉结构，可使工质完成两次压缩膨胀过程，下面具体来探究二段式喷嘴各结构对PEMFC系统氢气利用率的影响规律，为进一步优化喷嘴结构提供指导。

（1）喷嘴距NXP对氢气利用率的影响

NXP取值分组见表3，选取NXP=－6～6 mm，间隔为2 mm。边界条件设置为：一次流压力P_p=5 atm，二次流压力P_s= 2.03 atm，出口混合流体压力P_c= 2.28 atm，二次流湿度为80%。

表3 NXP取值分组

P_p(atm)	NXP/mm	D_{in}/mm	L_{in}/mm	L_s/mm	θs(°)
5	－6/－4/－2/0/2/4/6	5.8	46.4	63.8	10

模拟结果如图6所示，随着NXP的增加，ω和η呈先增加后减小的趋势，并在NXP=2 mm处达到峰值，最大值分别为1.89和92.41%。图7为P_p=5 atm时，NXP从－6 mm增加至6 mm氢气引射器的压力分布曲线。可以看出NXP=2 mm处，喷嘴出口和混合室全域保持最低压力。结合图8发现，NXP从6 mm减小至2 mm过程中，二段式喷嘴引射器喷嘴出口中心射流区流速逐渐增大，进而获得更低的低压区，在压差的作用下可引射更大流量的二次流体，引射性能得到改善，减少系统的氢气浪费，提高了PEMFC系统氢气利用率。然而，在NXP从2 mm减小至－6 mm过程中，喷嘴出口中心射流区流速逐渐减小，故同图4中总结的规律，ω和η不断变小，原因

是二段式喷嘴不断远离混合室，射流外侧流体遭遇壁面阻碍，形成不同程度的涡流，导致等容混合室入口压力增加，不利于引射二次流体，后续研究均采用NXP=2 mm。

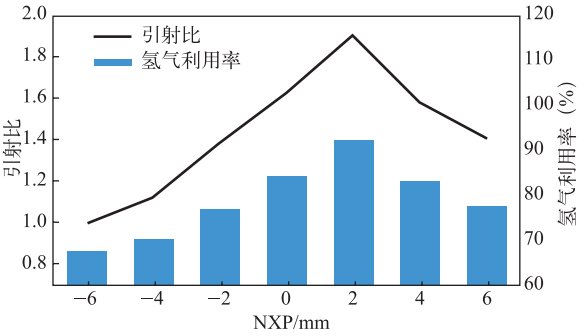


图6　NXP对引射比和氢气利用率的影响

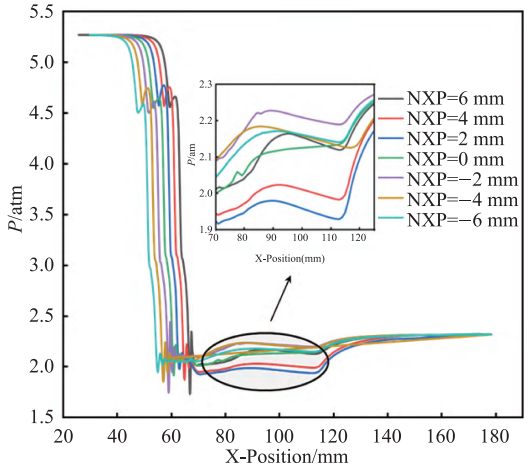


图7　不同NXP引射器中轴压力分布曲线

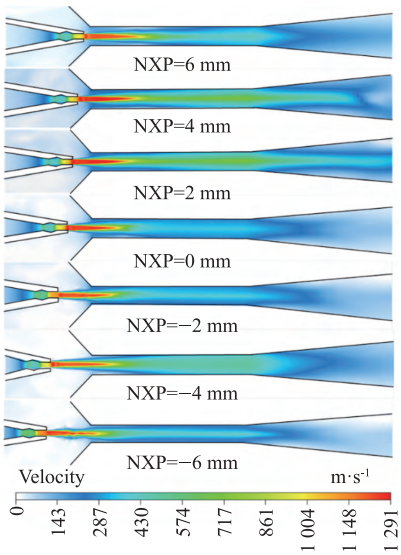


图8　不同NXP引射器的速度场

（2）第一级喷嘴喉部直径D_1对氢气利用率的影响

二段式喷嘴关键参数取值分组见表4，NXP取2 mm，其他结构参数和边界条件与前文统一。

表 4　二段式喷嘴关键参数取值分组

P_p/atm	D_1/mm	D_2/mm	D_3/mm	D_4/mm	D_m/mm
3/4/5	1.5～2.5(0.2)	3	1.7	1.7	5.8
3/4/5	1.9	2.6～3.6(0.2)	1.7	1.7	5.8
3/4/5	1.9	3	1.3～2.3(0.2)	1.7	5.8
3/4/5	1.9	3	1.7	1.7～2.7(0.2)	5.8
3/4/5	1.9	3	1.7	1.7	4～6.5(0.5)

D_1从1.5 mm变化到2.5 mm，间隔0.2 mm，模拟结果如图9所示，点线图代表左侧引射比，柱状图代表右侧氢气利用率。在三种不同工况压力下，D_1从1.5 mm增加到2.5 mm，η和ω呈先增后降的趋势。η和ω在D_1=1.5～1.9 mm范围内增速较快，且在D_1=1.9 mm处达到峰值，分别为1.85和92.71%，然后在D_1=1.9～2.5 mm区域内缓慢下降。图10位置1～4分别代表第一段喷嘴喉部、第一段喷嘴出口、第二段喷嘴喉部和扩压室入口。由图10可以看出，压力首先在第一段喷嘴中发生变化，并随D_1的增大而减小，这是因为D_1增加，喷嘴渐缩段中一次流体压力能与动能之间的转换量减小；然后，工质经过第二段喷嘴喷出至混合室。其中，D_1=1.9 mm表现出更低的压力区，这也符合图9分析的ω和η峰值规律。结合图11分析，当D_1从1.5 mm扩大至1.9 mm时，主射流区域整体速度不断增大，在喷嘴出口后形成更低的低压区，从而卷吸二次流体的效果更好，系统氢气利用率得到提高。出现这种内部速度差异是因为D_1的变化引起喷嘴中一次流体发生不同程度的膨胀和压缩。此外，D_1在1.5～1.7 mm内η和ω低下是因为D_1<D_3时，在第一级喷嘴收缩段中工质通过压力能与动能的转化已经获得较高的速度，因此，经过第二级喷嘴收缩段便不能更有效地获得降速收益。

综上，建议在二段式喷嘴氢气引射器的结构设计时，第一级喷嘴喉部直径略大于第二级，以便获得较高的引射性能，进而提高系统氢气利用率。后续研究均采用D_1=1.9 mm。

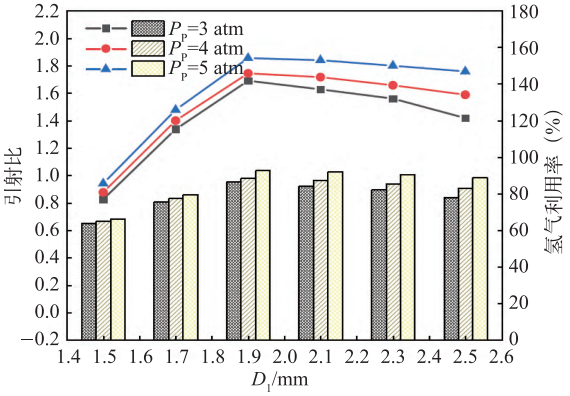


图9　D_1对引射比和氢气利用率的影响

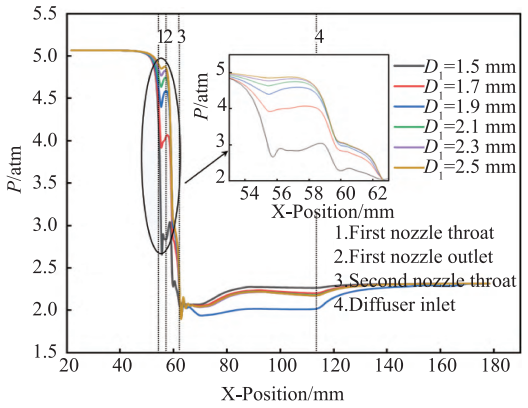


图10　引射器中轴压力分布（P_p=5 atm）

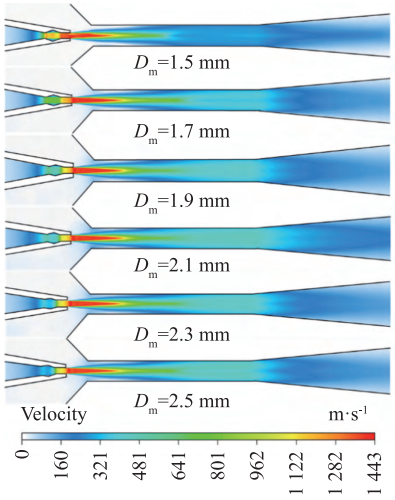


图11　不同D_1引射器的速度场（P_p=5 atm）

（3）第一级喷嘴出口直径D_2对氢气利用率的影响

见表4，D_2从2.6 mm变化到3.6 mm，间隔为0.2 mm，模拟结果如图12所示。在三种不同工况压力下，D_2从2.6 mm增加到3.6 mm，η和ω呈先增后降的趋势变化，但总体变化趋势不明显，在D_2=3 mm处达到峰值，分别为92.63%和1.85。此外，随一次流压力增大到5 atm，η和ω逐渐提高。由图13可知，由于D_2增大，在第一段喷嘴扩散段（位置1至2）轴向压力恢复程度不同，表现出D_2=3 mm处压力恢复效果最好，D_2在2.6～3.6 mm之间依次递减的规律。在位置3和4之间，谷值压力呈现D_2=3 mm最低、D_2=3.6 mm最高及其余基本重合的特征，分析可知，第一段喷嘴中最大峰值压力对应喷嘴出口最低谷值压力，即一次流体在第一段喷嘴中压力恢复效果更好，喷嘴出口可以获得更低的压力区。由图14可知，前五支（D_2=2.6～3.4 mm）引射器速度分布规律基本相同，但在D_2=3.6 mm处引射器中心射流速度明显较低，且由于速度不够，流体形状在等容混合室入口有分裂发散现象，不利于二次流体的卷吸，导致系统氢气利用率低下。

综上，增大D_2能够适当提高二段式喷嘴引射器的性能和系统的氢气利用率，本研究D_2=3 mm时效果最好，继续增大D_2，反而导致ω和η降低。

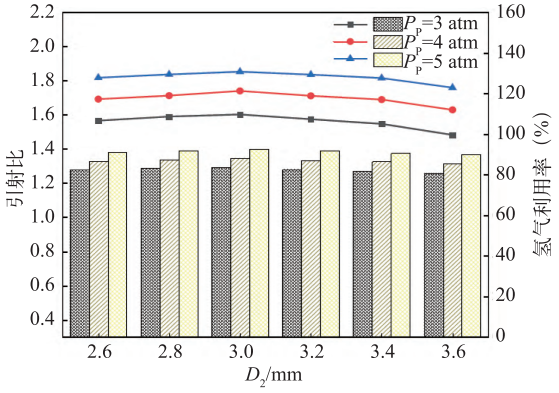


图12　D_2对引射比和氢气利用率的影响

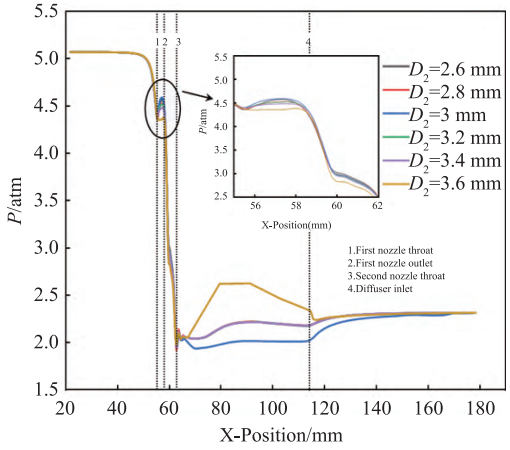


图13　引射器中轴压力分布曲线（P_p=5 atm）

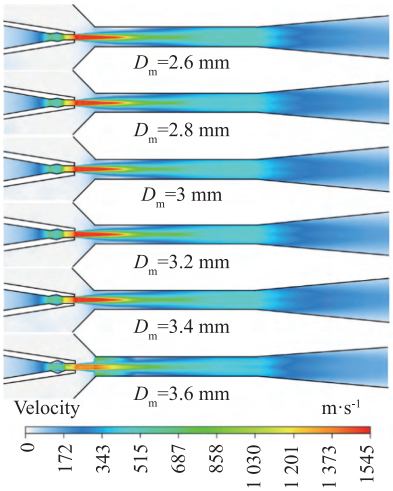


图14　不同D_2引射器的速度场（P_p=5 atm）

（4）第二级喷嘴喉部直径D_3对氢气利用率的影响

如表4，D_3取值1.3～2.3 mm，间隔为0.2 mm，模拟结果如图15所示。在不同P_p下，随D_3的增加，η和ω先增加后减小，并在D_3=1.9 mm处达到峰值。当P_p=5 atm时，η和ω最大值为D_3=1.9 mm处的88.14%和1.745。由图16可以看出，第一段喷嘴压力随D_3的增大而减小，这是因为在D_3变大时，喷嘴中一次流体的压力能与动能之间的能量转换发生了延迟。随后，主流体由喷嘴喷出进入混合室，引射器轴向压力发生剧烈波动，原因是一二次流体在混合室相遇，两股流体的速度差异很大，可能引发不同程度的激波。由图17可知，工作喷嘴出口主流域的高速带跟随D_3的增大，表现出先扩大再缩小的规律，并在D_3=1.9 mm处喷嘴出口主流域的高速带范围最大。高速带范围越大，低压区越大，从而夹带更多的二次流体，减少系统中的氢气消耗量，并带来氢气利用率的提高。

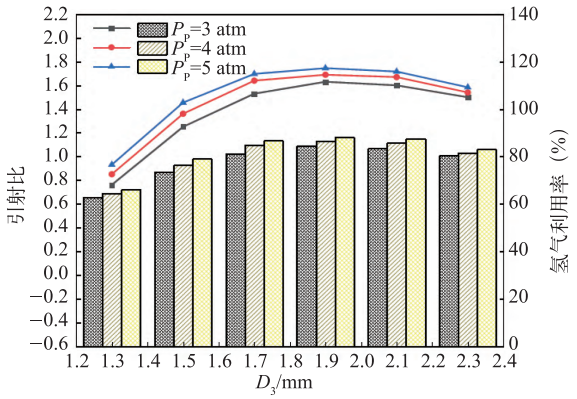


图15　D_3对引射比和氢气利用率的影响

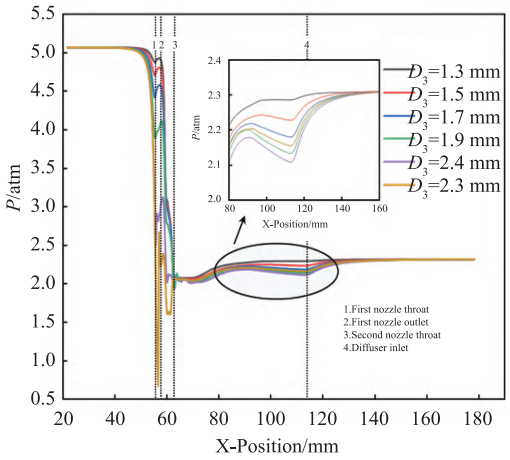


图16　引射器中轴压力分布曲线（P_p=5 atm）

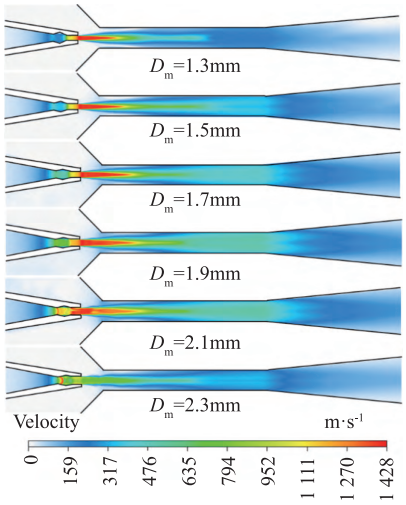


图17　不同D_3引射器的速度场（P_p=5 atm）

（5）第二级喷嘴出口直径D_4对氢气利用率的影响

见表4，D_4取值1.7 ～2.7 mm，间隔0.2 mm，模拟结果如图18所示。随着P_p提高，η和ω逐渐增加，文献[18]中也证明这种规律的正确性。当D_4不断增大时，η和ω呈现下降趋势。以P_p=5 atm为例，ω由D_4=1.7 mm处的1.87降低至D_4=2.8 mm处的1.24，η由D_4=1.7 mm处的93.5%降低至D_4=2.8 mm处的73.3%。

由图19可知，第二段喷嘴出口直径的不断减小，可以使喷嘴出口射流区域获得更低的压力，进而使引射器的引射性能和系统的氢气利用率得到提升。由图20可知，喷嘴出口射流区域速度与D_4呈负相关，即D_4增加，流体流速整体呈现减小趋势，且伴随流线不规则波动变化。此外，高速主流体夹带二次流体经过混合管延伸至扩散段的能力也随D_4的

增加而减弱。引起这种差异的原因是D_4的变化，使D_3和D_4之间截面积发生不同程度的变化，进而导致一次流体在第二段喷嘴出口段中发生不同程度的膨胀。D_4不断增大，喷嘴出口流域流速逐渐降低，流速低就无法形成较低的压力域，故夹带二次流体的能力受到限制，最终降低整个系统的氢气利用率。

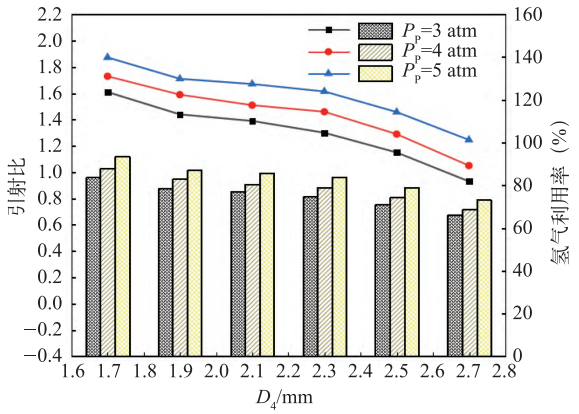


图18　D_4对引射比和氢气利用率的影响

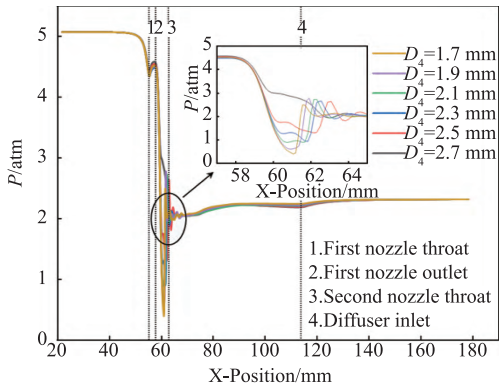


图19　引射器中轴压力分布曲线（P_p=5 atm）

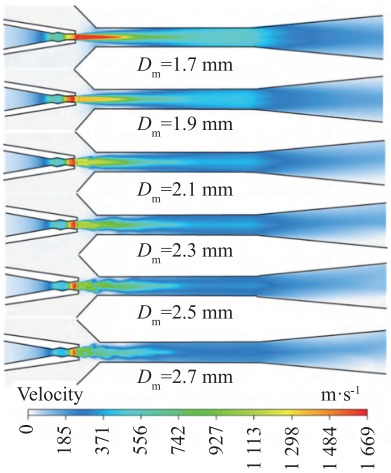


图20　不同D_4引射器的速度场（P_p=5 atm）

（6）混合室直径D_m对氢气利用率的影响

见表4，D_m取值4～6.5 mm，间隔0.5 mm，模拟结果如图21所示。与文献[19]提出的规律类似，在不同的操作压力P_p下，ω和η随D_4的增加表现出先骤升后缓降的趋势，ω的最大偏差达到6.7%。表明P_p对ω和η的影响也受到混合室直径D_m的制约，因此，在设计二段式喷嘴氢气引射器时，需要在最佳设计范围内综合考虑D_m的重要影响。由图22可知，两段喷嘴的压缩和膨胀特征以及主射流中心区域速度场表现出良好的相似性，速度差异并不大。但是混合流体进入等容混合室后，混合室直径与流速成反比，即伴随D_m在4 ～ 6.5 mm中的增加，流速有减小趋势，且混合流体延申至扩压管的流速会进一步降低。

由图22可知，曲线在1～3范围内表现出高度的重合性，说明二段式喷嘴出口前各工况的轴向压力

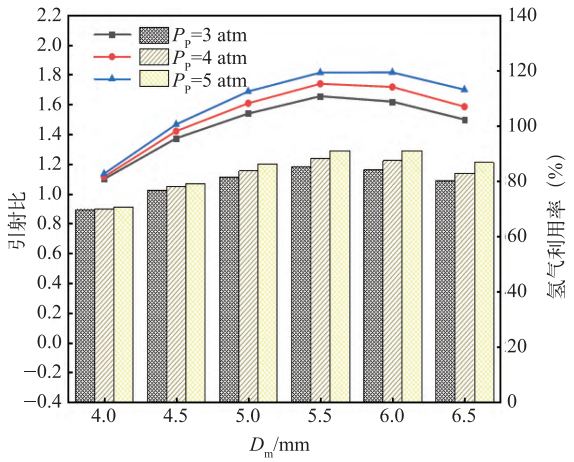


图21　D_m对引射比和氢气利用率的影响

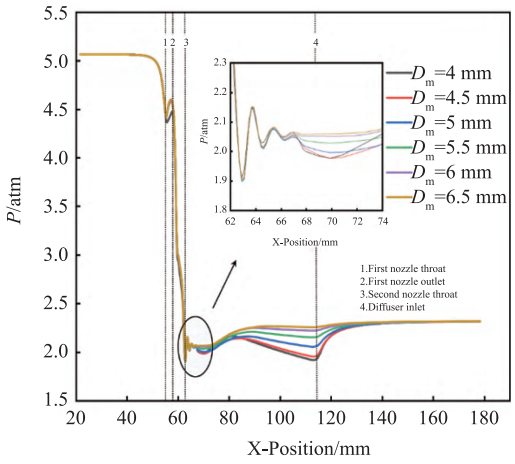


图22　引射器中轴压力分布曲线（P_p=5 atm）

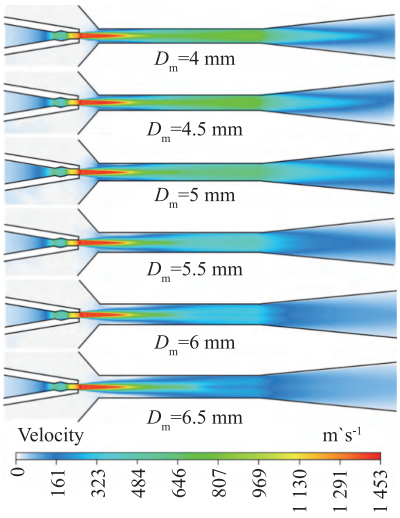


图23　不同D_m引射器的速度场（P_p=5 atm）

无明显差异。当主流体流入等压混合室时，轴向压力开始发生不同程度的波动变化，主要特征是先振荡下降而后伴随不同幅度的上升。此外，D_m增大过程中，混合室轴向压力呈上升趋势，这是由于较大的D_m可以为一、二次流体提供充分的混合空间来交换能量、均匀混合。

结束语

本文首先对比二段式喷嘴引射器和传统Laval喷嘴引射器的性能表现，发现二段式喷嘴引射器相较于传统Laval喷嘴引射器，使PEMFC系统氢气利用率同比提升了5.68%。其次，探究了新型引射器的喷嘴结构参数和混合室直径对氢气利用率的影响规律，结合速度云图及压力分布曲线分析得出以下结论：

1）随着NXP的增加，氢气利用率表现出先增后减的规律，并在NXP=2 mm处最优。喷嘴远离混合室引发的涡流会影响引射性能，导致PEMFC系统氢气利用率降低。

2）D_1从1.5 mm增加到2.5 mm，氢气利用率呈先陡增后缓降的趋势，并在D_1=1.7 mm处达最优。二段式喷嘴氢气引射器结构设计时，采取第一级喷嘴喉部直径略大于第二级的方式提高引射性能。

3）D_2从2.6 mm增加到3.6 mm，氢气利用率呈现先增后降的规律，但总体变化趋势不明显，在D_2=3 mm处最优。增大D_2能够适当提高二段式喷嘴引射器的性能和系统的氢气利用率。

4）随D_3的增加，氢气利用率先增后降，并在D_3=1.9 mm处最优。适当增加D_3会使二段式喷嘴引射器的性能提高，进而改善系统的氢气利用率。

5）随D_4的增加，氢气利用率呈下降趋势，在D_4=1.7 mm处的氢气利用率效果最好，达到93.5%。

6）氢气利用率随D_m的增加表现出先骤升后缓降的趋势，且增加P_p可以改善系统氢气利用率。

参考文献

[1] PEI P，REN P，LI Y，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．

[2] WANG X，XU S，XING C．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．

[3] 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．

[4] YIN Y，FAN M，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．

[5] 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．

[6] 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.
[7] 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.
[8] 杜微微．燃料电池客车动力系统的改进研究[D]．吉林：吉林大学，2016.
[9] 陈秋霖．可调式燃料电池引射器的性能计算分析与结构优化设计[D]．济南：山东大学，2021.
[10] BRUNNER D A，MARCKS 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.
[11] 刘展睿．燃料电池阳极引射器的数值模拟与蜗壳式设计[D]．天津：天津大学，2019.
[12] TASHTOUSH B M，AL-NIMR M A，KHASAWNEH M A. Investigation of the use of nano-refrigerants to enhance the performance of an ejector refrigeration system[J]. Applied Energy，2017，206：1446-1463.
[13] ZHOU M，WANG X，YU J. Theoretical study on a novel dual-nozzle ejector enhanced refrigeration cycle for household refrigerator-freezers[J]. Energy Conversion and Management，2013，73：278-284.
[14] WANG X，WANG L，SONG Y，et al. Optimal design of two-stage ejector for subzero refrigeration system on fishing vessel[J]. Applied Thermal Engineering，2021，187：116565.
[15] DONG J，LI S，MENG R，et al. Research on Cavitation Characteristics of Two-Throat Nozzle Submerged Jet[J]. Applied Sciences，2022，12(2)：536.
[16] 白世杰．质子交换膜燃料电池压力降及氢气利用率研究[D]．北京：北京建筑大学，2020.
[17] C Guangming，X Xiaoxiao，Shuang L，et al. An experimental and theoretical study of a CO_2 ejector[J]. International Journal of Refrigeration，2010，33(5)：915-921.
[18] JIA F T，YANG D Z，XIE J. Numerical investigation on the effect of second throat diameter on two-throat nozzle ejector[J]. Journal of Physics. Conference Series，2021，2047(1)：12020.
[19] JIA F，YANG D，XIE J. Numerical Investigation on the performance of Two-Throat Nozzle Ejectors with Different Mixing Chamber Structural Parameters[J]. Energies. 2021，14(21)：6900.

（上接第66页）

与防护，2018，39(5)：336-339.
[9] JIN T，CHENG Y. In situ characterization by localized electrochemical impedance spectroscopy of the electrochemical activity of microscopic inclusions in an X100 steel [J]. Corrossion Science，2011，53(2)：850-853.
[10] 陈旭，何川，张威，等，阴极极化条件下X80钢及其焊缝的氢渗透行为 [J]. 科技导报，2013，31(30)：28-33.
[11] ZHAO W，ZHANG T，ZHAO Y，et al. Hydrogen permeation and embrittlement susceptibility of X80 welded joint under high-pressure coal gas environment[J]. Corrosion Science，2016，111(10)：84-97.
[12] XUE H B，CHENG Y F. Characterization of inclusions of X80 pipeline steel and its correlation with hydrogen-induced cracking[J]. Corrosion Science，2011，53(4)：1201-1208.
[13] LUU W C，WU J K. Effects of sulfide inclusion on hydrogen transport in steels[J]. Materials Letters，1995，24(1-3)：175-179.
[14] YAMAMOTO K，YAMAMURA H，SUWA Y. Behavior of non-metallic inclusions in steel during hot deformation and the effects of deformed inclusions on local ductility[J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan，2011，51(12)：1987-1994.