

冲压发动机风洞引射器引射性能模拟

周璟莹, 邹伟龙, 黄立还

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘要: 蒸汽引射器是冲压发动机试验台用来实现高真空度的重要设备, 其工作环境复杂, 性能优化较为困难。简化并建立蒸汽引射器的模型, 通过 Fluent 软件对其工作情况进行数值模拟, 分析工作状态下引射器内流场变化情况, 并利用控制变量法分析引射器中水蒸气含量、工作流体压力、引射流体压力等工况参数对引射器工作能力的影响。通过与试验数据的对比, 验证模拟结果的可信度。结果表明: 引射流体流量增大时, 引射器效率升高; 引射流体中水蒸气从 0 变化到 50% 时, 引射系数由 0.45 降至 0.36。而当工作流体入口压力由 1.07 MPa 升至 1.42 MPa 时, 引射系数由 0.41 降低至 0.33; 引射流体入口压力由 12 kPa 升至 54 kPa 时, 引射系数由 0.12 升高至 0.43, 故在优化设计时应综合 2 个入口压力的影响。

关键词: 蒸汽引射器; 引射性能; 工况参数; 数值模拟; 引射系数

中图分类号: V211 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374(2019)02-0053-07

Simulation study on ejection performance of ramjet engine wind tunnel ejector

ZHOU Jingying, ZOU Weilong, HUANG Lihuan

(Xi'an Aerospace Dynamic Test Technology Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Steam ejector is an important equipment used in ramjet test-bed to achieve high vacuum. Its working environment is complex and thus its performance optimization is difficult. The model of steam ejector was simplified and established. The working condition of ejector was simulated by Fluent software. The change of flow field in the ejector under working condition was analyzed. The method of control variable was used to analyze the influence of working condition parameters such as water vapor content, working fluid pressure and ejector fluid pressure on ejector's working ability. The reliability of the simulation results was verified by comparing with the experimental data. The results show that the ejector efficiency increases with the increase of the flow rate of the ejector fluid, and the ejection coefficient decreases from 0.45 to 0.36 when the percentage of water vapor in the ejector fluid changes from 0 to 50%. When the inlet pressure of the working fluid rises from 1.07 MPa to 1.42 MPa, the ejection coefficient decreases from 0.41 to 0.33; when the inlet pressure of the ejecting fluid rises from 12 kPa to 54 kPa, the ejection coefficient rises from 0.12 to 0.43. So the influence of the two inlet pressures should be

收稿日期: 2018-05-21; 修回日期: 2018-11-20

基金项目: 装备预研共用技术项目(414030300101)

作者简介: 周璟莹(1992—), 女, 硕士, 研究领域为液体火箭发动机试验技术

comprehensively considered in the optimization design.

Keywords: steam ejector; ejection performance; working condition parameters; numerical simulation; ejection coefficient

0 引言

蒸汽引射器是冲压发动机试验台的重要设备,用以满足试验所需真空度,同时对内部流体起到减速增压的效果^[1-3]。该类引射器中的工作介质通常为大压缩比(大于 2.5)的可压缩流体,在工作过程中,由于流场中激波链、边界层的分离与再附、涡流等复杂物理现象的存在,导致有关引射器的结构设计带有很大的经验性,有关引射能力提高的研究也受到限制。一些学者对引射器性能进行了试验研究与分析,得到了引射器引射系数与工作条件、结构参数之间的规律^[4-6]。利用计算流体力学的手段及其可视化优点,揭示了引射器内部的流动细节,为其设计、优化提供依据。X. Yang 等^[7]利用流体力学手段对椭圆形、圆锥形等不同形状喷嘴进行分析比较,发现圆锥形喷嘴的喷射能力较其他几种更优;K. Pianthong 等^[8]模拟分析了蒸汽引射器结构(如喷嘴位置、喉管长度等)对其工作性能的影响,得到了最优几何结构;龙新平等^[9]对喉管长度不同的几种引射器内部流场进行数值模拟,发现引射器喉管长度与面积的比值影响最优喉管的长度;徐海涛、桑芝富^[10]运用 Fluent 软件对不同压缩比的引射器流场进行模拟,分析了不同操作状态下蒸汽引射器的工作能力,得出最佳工作点在其临界状态的结论;P. Desevaux^[11]和 Yu Han^[12]等运用 CFD 的可视化特点,分析了引射器流场内激波链变化、边界层分离情况以及内部压力场变化;袁丹青等^[13]对多喷嘴引射器内部流场进行计算模拟,并结合实验分析并验证了喷嘴数量与其工作能力的关系;孔凡超等^[14]分析了水和液氮作为掺混工质对于引射器引射能力的不同影响,得到了提高引射器极限真空度的方法;O A Evdokimov 等^[15]通过对比两种不同类型引射器用于不同工作方式下的模拟与试验结果,分析了其抽吸能力。

由于冲压发动机工况复杂,空气流量变化范围较大,试验用蒸汽引射器的工作状态需随之调整。通过流体力学软件 FLUENT 对引射器进行模拟分

析,对比讨论各影响因素对引射器性能的影响、不同工况下引射器的工作状态,为合理利用引射器、提高引射性能及工况参数的优化提供参考。

1 引射器结构及性能指标

本文分析的蒸汽引射器结构如图 1 所示,主要由接受室、引射喷嘴、混合室和扩散器 4 部分组成,3 个引射喷嘴呈间隔 120° 圆周排列。引射器工作时,工作流体(高压水蒸汽)通过引射喷嘴进入接受室,并在引射喷嘴出口形成高速低压区域;引射流体(主要为水蒸汽和空气的混合物)在内外压差的驱动下被吸入接受室,在工作流体膨胀和边界层粘性力的共同作用下进入混合室,与工作流体发生动量和能量的交换;混合后的蒸汽(压缩流体)经扩散器的导流扩压作用,动能转化为压力能后排出,在保证引射流体前端容器真空度的同时提高了引射流体的压力。

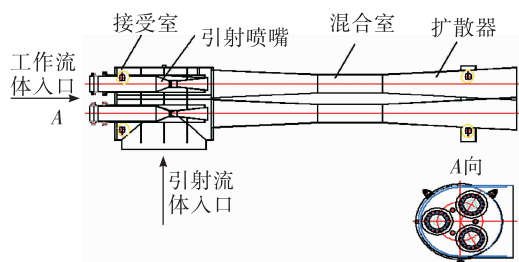


图 1 蒸汽引射器结构图

Fig. 1 Structure diagram of steam ejector

在发动机试验中,蒸汽引射器的工作能力关系试验成败,而引射器主要由以下几个性能参数进行评价。

1.1 引射系数

指在一定工况下,单位质量工作流体通过引射器所能抽吸的引射流体流量,在数值上与引射流体和工作流体的质量流量之比相等,即

$$u = M_1 / M_p$$

式中: u 为引射系数; M_1 为引射流体的质量流量, kg/s; M_p 为工作流体的质量流量, kg/s。

1.2 引射器效率

用以衡量引射器的完善性,是引射流体获得工作能力与工作流体丧失工作能力的比值,即

$$\eta = u(p_c/p_h)/(p_p/p_c)$$

式中: η 为引射器效率; p_c 为压缩流体压力(即引射器出口压力),MPa; p_h 为引射流体压力,MPa; p_p 为工作流体压力,MPa。

引射系数是评价蒸汽引射器工作性能的重要指标,也是本文分析时重点考察的参数之一;引射器效率在引射、工作和压缩流体初始参数不变的前提下,取决于引射系数 u 的大小。

当引射器结构尺寸一定时,引射系数的大小不仅与引射流体的质量流量有关,工作流体压力、引射流体中水蒸气所占的百分比等均会影响引射器的引射能力。基于上述对引射器结构及工作原理的描述建立模型,对各项参数与蒸汽引射器性能之间的关系进行分析讨论。以图1所示引射器结构为例,由于该型引射器每套喷嘴、混合室与扩散器均可独立工作,且为轴对称结构,因此只分析其中一套结构即可。

2 额定工况流场分析

2.1 网格及边界条件

计算域包括喷嘴、混合室及扩散器段,对喷嘴喉部的网格进行加密,得到引射器的二维网格模型如图2所示。



图2 网格示意图

Fig. 2 Grid schematic diagram

边界条件设置如下:

- 1) 引射流体入口: $M_1 = 38.16 \text{ kg/s}$, 混合流体中水蒸气的质量百分比 $\alpha = 22\%$;
- 2) 工作流体入口: $p_p = 1.27 \text{ MPa}$, $\alpha_1 = 100\%$;
- 3) 混合流体出口: $\alpha_2 = 0$, $p_c = 95\,600 \text{ Pa}$ (取当地大气压);
- 4) 壁面边界条件: 无滑移绝热壁面。

2.2 额定工况流场分析

使用 FLUENT 对额定工况下蒸汽引射器的工作

状态进行仿真分析。

2.2.1 引射器内压力场分布

由图3可分析引射器工作过程。引射器内部的压力在喷嘴前后发生剧烈变化,即高压工作流体经过喷嘴喉部后压力迅速降低,在出口处形成低压区,将引射流体吸入混合室中;2种流体在混合室充分混合后,再经由扩压器提升压力,最终引射到大气中。

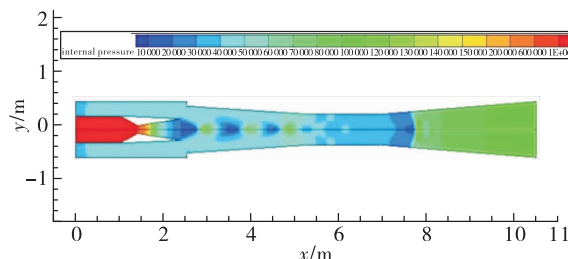


图3 引射器内部压力场分布云图

Fig. 3 The contours of the internal pressure field of the ejector

结合图3和图4可以发现,喷嘴出口后的压力急剧降低后,转变为围绕某一值的振荡变化形式,这是由于超音速流体在扩张段要进行减速增压,为达到出口压力必然在扩张段产生激波间断,强激波和较强的逆压梯度必然诱发边界层的分离;而又由于流体有自动选择和维持最稳定流动结构的特性,随着时间的发展,边界层不断分离再附,引射器的轴线位置形成激波链,流体速度和压力也随之发生振荡,直至流场趋于定常。

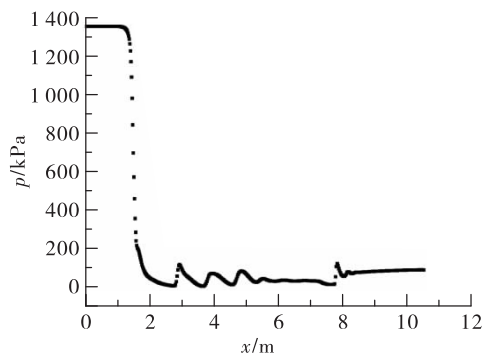


图4 轴线处压力散点图

Fig. 4 Pressure scatter plot at axis

2.2.2 引射器内速度场分布

由图5中的马赫数分布云图可看出,工作流体

在喷嘴等截面段达到音速,在喷嘴扩张段速度不断增大;通过喷嘴之后为超音速状态,并在剪切作用下带动引射流体进入混合室,形成混合边界层,边界层外部为亚音速流体,内部为超音速流体。在混合过程中,伴随着能量交换,在喷嘴边缘产生一道斜激波,诱发边界层的第一次分离,使得主流通道等效截面收缩,出现第一个喉道;然后等效流道扩张,流体再加速。之后由于逆压梯度的作用,激波链结构由初始的分叉激波-膨胀波单元发展为压缩波-膨胀波单元,即喉道前后的流体速度仍为超音速,但喉道前的流体受到压缩,喉道后的流体随着流道的扩张而加速,同时,流道收缩减缓,流道收缩处的边界层变厚,激波强度逐渐减弱。最后,在扩散器的扩张段,激波链单元结束,超音速流体与亚音速区域逐渐混合,在无激波的状态下增压减速至较均匀的亚音速状态。

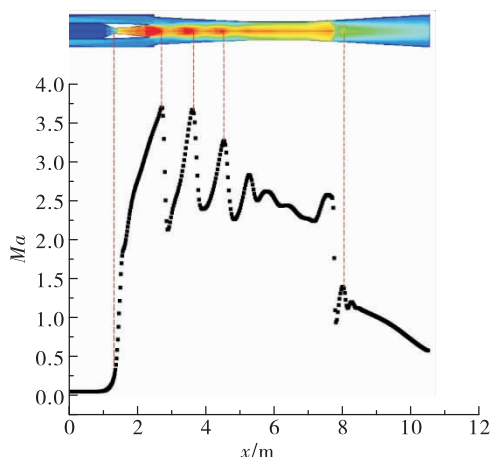


图 5 马赫数散点图

Fig. 5 Maher number scatter plot

结合轴线位置的马赫数散点图分析可知,引射器内轴线处的速度变化与压力变化一样,都受激波链作用而不断振荡变化。在激波产生的初始阶段(即喷嘴出口位置),速度最高达 3.7 倍声速;随着激波链强度的减弱,振荡曲线的最高点不断降低(但马赫数仍大于 1),直至激波链结束后,气流才变为亚声速流体。

2.2.3 数值模拟结果合理性验证

为了验证引射器仿真模拟结果的准确性,将模拟所得的引射压力与试验中传感器采集到的压力

进行对比,引射流量为 38.16 kg/s,模拟所得引射压力为 39.7 kPa,试验采集的压力为 36 kPa,误差为 9%,在误差允许范围内,说明数值模拟条件设置合理,结果具有参考意义。

3 不同操作工况参数下引射能力的分析

对于本文中结构尺寸一定的蒸汽引射器引射性能的分析,主要研究各操作工况参数对引射性能的影响,结合冲压发动机试验台系统中蒸汽引射器的实际工作情况,选取引射流体流量(单喷嘴) M_i ,引射流体中水蒸气所占百分比 α ,工作流体压力 p_p 这和引射流体压力 p_h 这 4 个工况参数进行研究。

3.1 引射流体流量的影响

以工作流体压力 $p_p = 1.27$ MPa,引射流体中水蒸气所占百分比 $\alpha = 22\%$ 为前提不变,模拟引射流体流量 M_i 从 23.16 kg/s 变化到 53.16 kg/s(即单喷嘴流量由 7.72 kg/s 变到 17.72 kg/s)时引射器的工作情况,得到引射器效率随引射流体流量变化的趋势如图 6 所示。从图 6 中可看出,引射器的效率随引射流体流量的增加而升高,这是由于引射流体流量增加时,引射流体的压力也得到提高,两者综合作用导致引射器效率的升高。

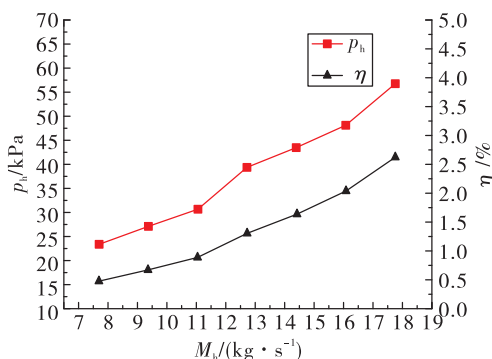


图 6 引射流体流量(单喷嘴)对引射器效率的影响

Fig. 6 Effect of ejecting fluid flow (single nozzle) on efficiency of ejector

通过对比不同引射流体流量时引射器内部的速度云图(如图 7 所示)可以发现,引射流体流量越大,激波链的有效长度越长,但强度越小;激波链形状由长链状逐渐发展为钻石链状,激波链收缩处的混合边界层扩大,流体流通量增大,故引射流体所获得的工作能力增大,引射器的效率升高。

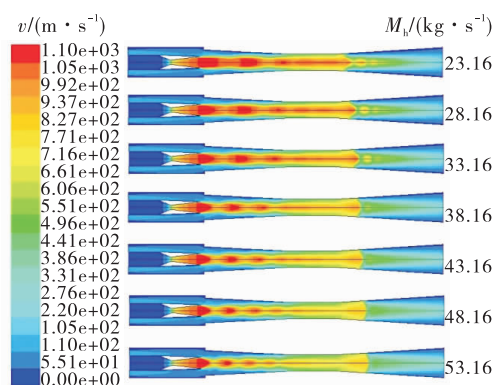


图7 不同引射流体流量时引射器内部速度场的变化

Fig. 7 Variation of velocity field in ejector during different ejection fluid flow rate

3.2 引射流体中水蒸气所占百分比的影响

为了研究引射流体中水蒸气所占百分比对引射器性能的影响,将引射流体入口边界条件由流量入口改为压力入口,设定引射器的工作流体压力为 1.27 MPa,引射流体压力为 33 kPa,模拟引射流体中水蒸气所占百分比从 0 变化到 50% 时引射器的工作情况,得到引射流体中水蒸气所占百分比对引射性能的影响趋势如图 8 所示。

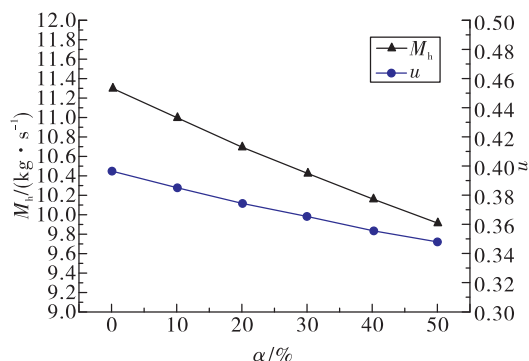


图8 引射流体中水蒸气含量的影响

Fig. 8 Influence of water vapor content in ejecting fluid

由图 8 可知,引射流体的流量随着引射流体中水蒸气含量的增大而减小,而工作流体流量不变,故引射器的引射系数随水蒸气含量的升高而呈现降低的趋势,水蒸气所占百分比 α 由 0 增大到 50%,引射系数由 0.45 降低至 0.36。

3.3 工作流体压力的影响

参考试验数据设置引射流体入口压力 p_h 为 33 kPa,然后分别取工作流体入口压力 p_p 为

1.07 MPa, 1.12 MPa, 1.17 MPa, 1.22 MPa, 1.27 MPa, 1.32 MPa, 1.37 MPa 及 1.42 MPa,其模拟结果如图 9 所示。

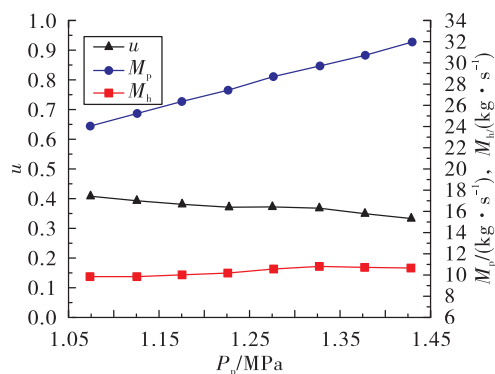


图9 工作流体压力的影响

Fig. 9 The effect of working fluid pressure

分析可得,引射系数随着工作流体压力的增大而降低,当工作流体压力 $p_p = 1.42$ MPa 时,引射系数 $u = 0.33$,为此段数据中的最小值。引射流体的流量随着工作流体压力的升高而缓慢增大,且在 $p_p > 1.32$ MPa 后,数值基本不再增大;而工作流体的流量随着工作流体压力的升高而增大,且工作流体流量的增加远大于引射流体流量的增加,故增大工作流体压力对引射系数的提高无积极作用。

如图 10 所示,选取引射器喷嘴出口(A)、混合室等直段两端(B和C)、扩散器出口(D)4个截面,对比不同工作压力下各截面的马赫数分布。



图10 截面位置图

Fig. 10 Section position distribution

从图 11 可以看出,当工作压力从 1.07 MPa 提高到 1.47 MPa 时,流体的流速整体得到提高,其中 A, B 两截面上的马赫数增大体现为对称轴 ($y = 0$ mm) 附近的极值点增多,即轴线附近流体的马赫数数值整体增高;而混合室等直段出口和引射器出口(即 C, D 截面)处的马赫数分布变化明显, C 截面对称轴位置的马赫数由 2.18 增大到 2.72, D 截面同位置的马赫数由 0.26 变化为 0.62。这是由于随着工作流体压力的升高,引射器内流体相互作用产生的激波链强度增加(如图 12 所示),喷嘴出口的流

体速度整体提高较大,故流体通过扩压器等直段后马赫数增大明显。因此,适当增大工作流体压力,可提高流体的速度,从而使引射器抽吸能力得到提升。

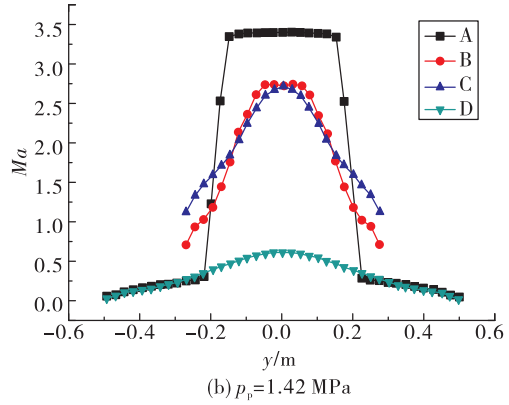
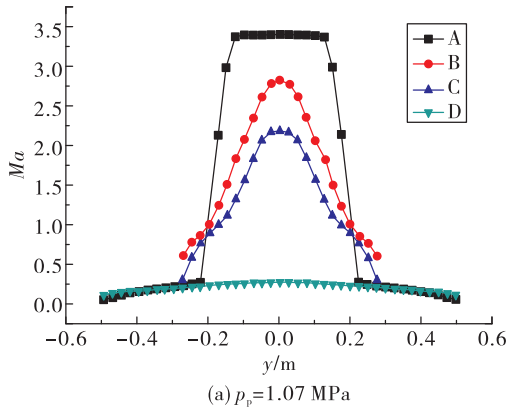


图 11 不同工作压力下的马赫数分布图
Fig. 11 Mach number distribution under different working pressures

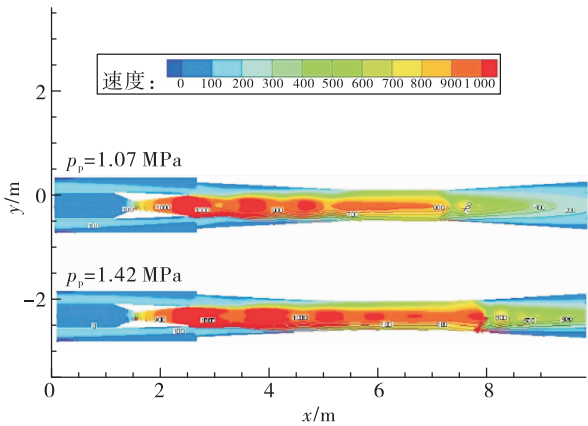


图 12 引射器速度分布云图
Fig. 12 Velocity distribution in ejector

3.4 引射流体压力的影响

为了研究引射流体压力对引射器性能的影响,

参考试验数据设置工作流体入口压力 p_p 为 1.27 MPa,然后分别取引射流体入口压力 p_h 为 12 kPa,19 kPa,26 kPa,33 kPa,40 kPa,47 kPa 及 54 kPa,模拟结果如图 13 所示。不同引射压力下的马赫数分布如图 14 所示。

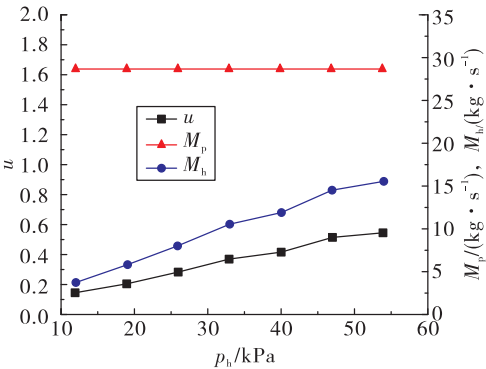


图 13 引射流体压力的影响
Fig. 13 Effect of ejector fluid pressure

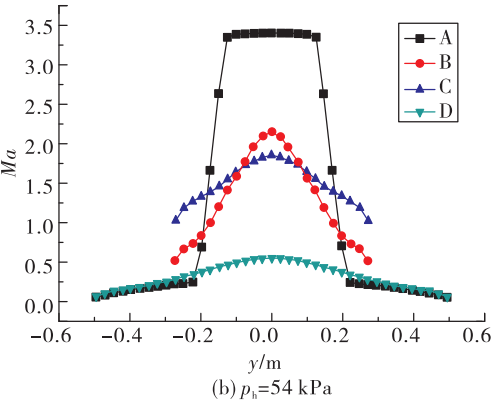
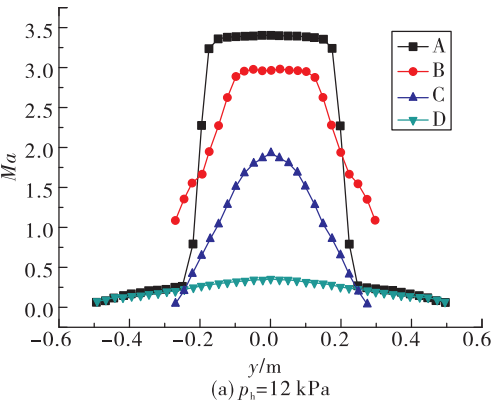


图 14 不同引射压力下的马赫数分布图
Fig. 14 Mach number distribution diagram under different ejector pressure

分析可知,随着引射流体压力的升高,工作流体流量不变,而引射流体的流量不断增加,因此引

射系数随引射流体压力的增大而提高。从引射器工作机理上分析,原因主要为:增加引射流体压力,会使喷嘴出口处工作流体与引射流体的压差变大,引射流体进入接受室的推动力得以增大,促进了2种流体的混合,从而提高了引射系数。因此,可以通过适当提高引射流体压力,使引射系数增加。

同样选取图10所示A,B,C,D这4个截面,由图14可知,引射流体压力从12 kPa提高到54 kPa,各截面处的马赫数分布变化较大,B截面处的马赫数值明显降低,轴线位置的马赫数值由2.97变为2.15,这是因为引射流体压力越高,流量越大,则激波链有效长度增加,激波链发展更加充分、强度降低,混合流体流速下降(如图7所示);而C,D截面处的马赫数值均略有提高,这是因为当引射压力提高时,被吸入的引射流体流量增大,从而导致出口压力稍有升高。因此,引射流体压力过高时,将会导致引射器抽吸能力的降低。

4 结论

通过上述分析,可以得到如下结论:

1)对引射器内部流场的模拟分析结果与试验数据的对比误差较小,相关分析结果可以为优化引射方案提供参考。

2)引射流体中水蒸气含量增大会导致引射器引射系数的降低,故该型引射器在使用时应控制引射流体中水蒸气所占的比例。

3)引射流体压力一定,该型引射器的引射系数随着工作流体压力的提高而稍有降低,但引射器抽吸能力增强;反之,增大引射流体压力,引射系数上升,而引射器抽吸能力降低。故在工作参数设计时应综合考虑两个压力的影响,方能获得能力均衡、性能完善的引射器工作工况。

参考文献:

- [1] 陈健,吴继平,吕辉强,等. 二维超声速空气引射器启动特性试验研究[J]. 国防科技大学学报,2010(5):7-11.
- [2] 鲁佳,李鹏飞,刘威,等. 液-液引射器的研究与应用进展[J]. 科技视界,2018(1):154-155.
- [3] 刘芬,杜圣飞,王龙飞,等. 蒸汽喷射器的CFD模拟研究[J]. 冶金能源,2017,36(2):31-34, 37.
- [4] 赵宏,张海栋,赵春宇. 超音速环形蒸汽引射器启动特性试验研究[J]. 火箭推进,2010,36(2):48-52.
ZHAO Hong,ZHANG Haidong,ZHAO Chunyu. Experimental investigation on start performance of supersonic steam annular ejector[J]. Journal of Rocket Propulsion,2010,36(2):48-52.
- [5] 吴昊,吴文广,孙进,等. 多喷嘴液液引射器的试验与数值模拟研究[J]. 能源工程,2018(4):17-23.
- [6] 崔明功,郭然. 环形引射器流场研究[J]. 火箭推进,2015,41(2):75-78.
CUI Minggong,GUO Ran. Study on flow field of annular ejector[J]. Journal of Rocket Propulsion,2015,41(2):75-78.
- [7] YANG X, LONG X, YAO X. Numerical investigation on the mixing process in a steam ejector with different nozzle structures[J]. International Journal of Thermal Science, 2012, 56: 95-106.
- [8] PIANTHONG 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.
- [9] 龙新平,朱劲木,梁爱国,等. 射流泵喉管最优长度的数值计算[J]. 水利学报,2003(10):14-18.
- [10] 徐海涛,桑芝富. 蒸汽喷射器喷射系数计算的热力学模型[J]. 化工学报,2004,55(5):704-710.
- [11] DESEVAUX P, LANZETTA F, BAILLY Y. CFD modeling of shock train inside a supersonic ejector: validation against flow visualization and pressure measurements in the case of zero-secondary flow[C]//10th International Symposium on Flow Visualization. Japan: Kyoto, 2002.
- [12] HAN Y, WANG X D, SUN H, et al. CFD simulation on the boundary layer separation in the steam ejector and its influence on the pumping performance[J]. Energy, 2018(2):167-172.
- [13] 袁丹青,白滨,王冠军,等. 多喷嘴射流泵流场的数值模拟与PIV测量[J]. 排灌机械,2009,27(1):35-38.
- [14] 孔凡超,刘万龙,胡旭坤,等. 蒸汽发生器掺混工质对引射性能的影响分析[J]. 火箭推进,2016,42(1):77-82.
KONG Fanchao,LIU Wanlong,HU Xukun,et al. Influence of steam generators mixture on its ejection performance[J]. Journal of Rocket Propulsion,2016,42(1):77-82.
- [15] EVDOKIMOV O A, PIRALISHVILI S A, VERENNIKOV S V, et al. CFD simulation of a vortex ejector for use in vacuum applications[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018(1):11-28.

(编辑:马 杰)