

可调式喷射器流场数值分析

张 琨^{1,2}, 刘 佳¹, 沈胜强^{*1}

(1. 大连理工大学 海洋能源利用与节能教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 大连海洋大学 食品工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要: 建立了可调式喷射器的数学模型, 使用 FLUENT 软件模拟了调节锥在不同位置的喷射器内部流场. 结果显示, 喷射器轴线上的压力在等截面混合室中呈线性增加; 在扩压室的初始段升高迅速, 中后段升高缓慢. 混合室内中心部位的流速与边缘流速差异较大. 调节锥轴向进入喷嘴喉部使激波位置移向上游, 工作流量减少.

关键词: 喷射器; 喷嘴; 可调节; 超音速; 流场
中图分类号: TH451 **文献标志码:** A

0 引言

喷射器是一种应用广泛的流体机械, 它利用工作流体的射流来实现能量转化, 并以显著的节能效果、低污染的工作性能及结构简单、造价低廉、操作和维修方便等优点, 在水利、电力、交通、化工、冶金、石油、矿山、核工业、航空及航天等领域得到广泛的应用.

喷射器问世已有很长的时间, 经典理论设计的喷射器结构大多数是固定的. 但实际运行的喷射器工作参数并非一成不变, 对于固定结构的喷射器, 工作条件改变意味着喷射器效率的降低, 且参数可调节的范围有限. 可调式喷射器通过调节喷嘴喉部及出口的截面积, 实现对喷射器工作参数变化的适应或对出口参数的控制^[1], 因此使用起来更稳定、更经济、更方便, 有一定的工程应用价值.

喷射器内部的混合流动过程非常复杂, 对于喷射器性能的研究多使用一维方法^[2~5], 因而对喷射器内部流场的信息了解不够. 近年, 随着计算机技术的不断进步, 计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 提供了一种研究流体运动

的新方法. 它不仅能描绘大致的流场状态, 还能提供一些实验不能或者很难测定的信息^[6~8]. 本文使用 FLUENT 软件, 对喷射器的内部流场进行数值模拟, 分析压力、速度等参数的变化关系, 探讨喷嘴结构调节对喷射器性能的影响.

1 区域离散与数值计算方法

1.1 控制方程

根据喷射器内部流场的特点, 采用如下假设:

- (1) 工作流体和引射流体具有相同的相对分子质量和比热容, 且为稳定的轴对称流动;
- (2) 喷嘴出口截面上工作流体和引射流体互不混合;
- (3) 工作流体和引射流体以及混合流体在任意截面上具有均匀的物性分布;
- (4) 喷嘴和扩压段内是等熵过程, 不考虑热量损失;
- (5) 忽略流体浮力的影响.

非定常可压缩流体满足如下的 N-S 方程^[9]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} \mathbf{W} dV + \oint_{\partial\Omega} \|\mathbf{F} - \mathbf{G}\| dA = \iiint_{\Omega} \mathbf{H} dV$$

式中: Ω 是控制体, $\partial\Omega$ 是控制体边界面, \mathbf{W} 是求解

变量, F 是无粘通量, G 是粘性通量, H 是能量源项, W 、 F 、 G 的向量表示形式如下:

$$W = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{pmatrix}, F = \begin{pmatrix} \rho U \\ \rho U u + p i \\ \rho U v + p j \\ \rho U w + p k \\ \rho U E + p U \end{pmatrix}, G = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{xi} \\ \tau_{yi} \\ \tau_{zi} \\ \tau_{ij} v_j + q \end{pmatrix}$$

式中: ρ 是密度, u 、 v 、 w 是速度分量, E 是单位体积总能, U 是速度矢量, p 是流体压力, i 、 j 、 k 是单位矢量, τ_{xi} 、 τ_{yi} 、 τ_{zi} 、 τ_{ij} 是粘性应力张量, q 是热对流项。

1.2 计算方法及网格

考虑可调式喷射器混合段入口截面处引射流体的速度与工作流体速度相比很小, 为了简化计算, 将喷射器引射流体的侧向入口简化成轴向环形入口, 忽略横向进入喷射器的流体对引射室内流动的扰动, 从而喷射器内的流动过程简化为二维流动。通过计算结果对比发现, 简化的二维模型与三维模型并无明显差异^[10], 因此本文采用二维模拟。

控制方程采用有限容积法离散, 标准 $k-\epsilon$ 模型求解, 壁面函数法对近壁面处网格修正, 从而数值模拟混合过程。采用分块结构化网格, 将二维的可调式喷射器划分为两个面域, 交界面处共用一条边, 保证了网格的连续性。图 1 分别给出了计算网格的示意图和喷嘴与调节锥的网格放大图, 实际网格数量 45 098 个。

本文计算当调节锥轴向进入喷嘴, 喉部面积由 64 mm^2 逐渐减小到 59 mm^2 时可调式喷射器的流场。在此过程中, 喷嘴出口面积始终保持 71 mm^2 。取喷射器的轴线为 x 轴, 喷嘴入口截面为 y 轴, 喷射器其他主要尺寸为喷嘴入口直径 42 mm , 吸入室入口直径 93 mm , 等截面混合室长度 180 mm , 扩压室长度 300 mm 。

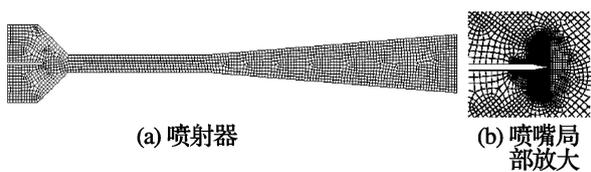


图 1 可调式喷射器及喷嘴局部的网格划分
Fig. 1 Grid of the adjustable ejector and nozzle

1.3 流体物性及边界条件

工作流体和引射流体的入口均采用压力入口条件, 出口流体采用压力出口条件, 给定静压和适当的回流条件; 滞止压力、滞止温度和湍流条件给定; 工作流体为水蒸气, 固体壁面为无滑移、无渗透的绝热边界。

2 计算结果分析

对气体喷射器的特性来说, 混合室与喷嘴喉部的面积比起主要作用^[11]。调节锥的轴向移动改变了面积比, 从而影响喷射器的性能。

图 2 显示, 压力为 0.3 MPa 的工作流体从喷嘴高速流出, 膨胀形成的真空把 0.08 MPa 的引射流体吸入混合室。在混合室内工作流体与引射流体混合, 实现动量、能量和质量的交换, 这一过程流体压力比较稳定, 符合常压混合的理论^[3]。混合流体在扩压室压力逐渐恢复, 直到出口处压力达到 0.22 MPa 。

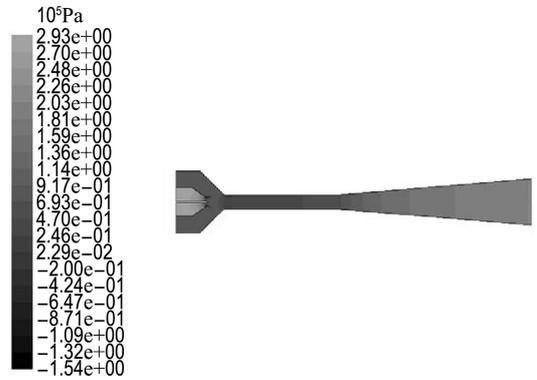
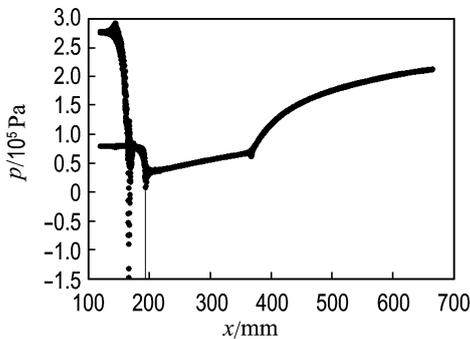


图 2 可调式喷射器的静压分布
Fig. 2 Static pressure distribution of the adjustable ejector

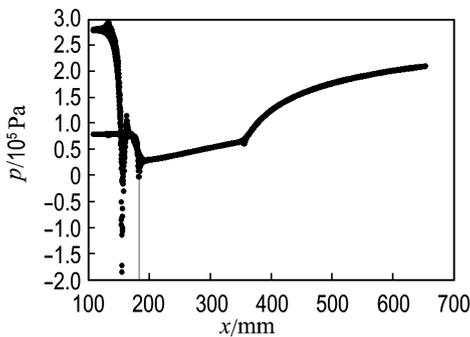
图 3 给出了调节锥在不同位置时喷射器轴线上的压力分布。在喷射器蒸气参数相同的条件下, 图 3(a) 表示喉口面积 64 mm^2 时, 喷嘴出口处的激波发生在 195 mm ; 图 3(b) 表示喉口面积 59 mm^2 时, 喷嘴出口处的激波发生在 180 mm (两图所取的坐标原点相同)。由此可见, 调节锥移入喷嘴使流体能量降低, 激波发生的位置提前, 这与工作流量因喷嘴喉口面积减小而减少相符合。整个过程中, 工作流量从 10.44 kg/s 减少到 9.89 kg/s 。

s,减少 5.3%.

在等截面混合室中,轴线上的流体压力从 0.26 MPa 线性增加至 0.60 MPa;流体继续向下游流动进入扩压室,由于流动面积增大,扩压室的初始段(360~460 mm)轴向压力快速升高至 1.5 MPa,变化斜率是中后段(460~660 mm)的 4.5 倍.在扩压室的中后段,压力升高逐渐放缓,直到背压.



(a) 喷嘴喉口截面积 64 mm²



(b) 喷嘴喉口截面积 59 mm²

图3 可调式喷射器轴向静压分布

Fig. 3 Static pressure distribution along the axis of the adjustable ejector

图4显示,高压的工作流体进入喷嘴后急剧加速,在喉部到达音速.高速流体产生的真空把引射流体吸入混合室,混合室内中心部位的流速与边缘流速有较大差异,但这种差异沿着流向逐渐减小.

在等截面混合室入口附近,由于激波的影响,喷射器轴线上流体速度从 550 m/s 急剧增大至 650 m/s.而后流速逐渐降低,在等截面混合室出口处降至 620 m/s.取等截面混合室半径的 1/2 所在直线上的速度与轴线上的速度做比较,发现速度的变化趋势相似,但绝对值减小.在等截面混

合室入口附近的流速由 485 m/s 陡然增至 505 m/s,而后逐渐降至 465 m/s.在扩压室内,随着流体压力的回升,速度降低.扩压室出口轴线上的流体速度为 230 m/s,扩压室出口半径 1/2 处的流速为 130 m/s.从图4也可直观地看出,流体速度在扩压室内的分布进一步趋于均匀,但相对管内流动来说,这种差异还是较大的.

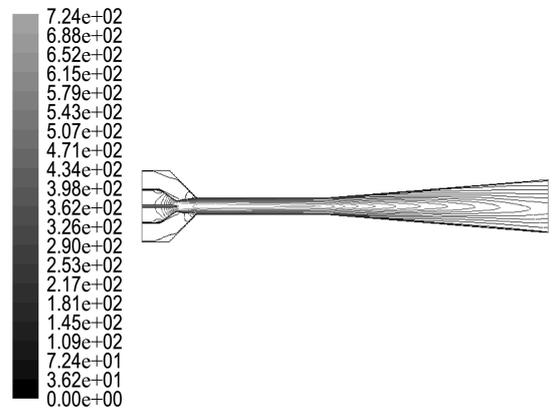


图4 可调式喷射器的速度分布

Fig. 4 Velocity distribution of the adjustable ejector

3 结论

本文应用 CFD 方法观察了可调式喷射器的流场.计算结果显示,喷射器的轴线压力在等截面混合室中呈线性增加;在扩压室的初始段轴向压力升高迅速,中后段压力恢复放缓.混合室内中心部位的流速与边缘流速有较大差异,但这种差异沿着流向逐渐减小.可调式喷射器的喷嘴喉口面积由 64 mm² 减至 59 mm²,激波位置移向上游 15 mm,工作流体的流量减少 5.3%.

参考文献:

- [1] 沈胜强,张 琨. 可调式气体喷射器调节性能计算分析[J]. 石油化工高等学校学报, 2007, 20(1):74-76
- [2] CHUNNANONOD K, APHORN RATANA S. An experimental investigation of a steam ejector refrigerator: the analysis of the pressure profile along the ejector [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2004, 24(2-3):311-322
- [3] ROGDAKIS E D, ALEXIS G K. Investigation of ejector design at optimum operating condition [J].

- Energy Conversation Management**, 2000, **41**(17): 1841-1849
- [4] EAMES I W. A new prescription for the design of supersonic jet-pumps: the constant rate of momentum change method [J]. **Applied Thermal Engineering**, 2002, **22**(2):121-131
- [5] 李海军,沈胜强,张 博,等. 蒸汽喷射器流动参数与性能的数值分析[J]. **热科学与技术**, 2005, **4**(1):52-57
- [6] SRIVEERAKUL T, APHORNRATANA S, CHUNNANONOD K. Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics. Part 2. Flow structure of a steam ejector influenced by operating pressures and geometries [J]. **International Journal of Thermal Sciences**, 2007, **46**(8):823-833
- [7] RIFFAT S B, GAN G, SMITH S. Computational fluid dynamics applied to ejector heat pumps [J]. **Applied Thermal Engineering**, 1996, **16**(4):291-297
- [8] BARTOSIEWICZ Y, AIDOUN Z, DESEVAUX P, *et al.* Numerical and experimental investigations on supersonic ejectors [J]. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, 2005, **26**(1):56-70
- [9] 徐海涛,桑芝富,顾 斌,等. 蒸汽喷射真空泵性能的 CFD 模拟研究[J]. **高校化学工程学报**, 2005, **19**(1):22-29
- [10] 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
- [11] 张 博,沈胜强,李海军. 二维流动模型用于喷射器关键结构设计分析[J]. **大连理工大学学报**, 2004, **44**(3):388-391
(ZHANG Bo, SHEN Sheng-qiang, LI Hai-jun. Study of a two-dimensional flow model on design and analysis of ejector key structure [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2004, **44**(3):388-391)

Numerical simulation of flow inside an adjustable ejector

ZHANG Kun^{1,2}, LIU Jia¹, SHEN Sheng-qiang^{*1}

(1. Key Laboratory of Ocean Energy Utilization and Energy Conservation of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Food Engineering College, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract: A mathematical model of the adjustable ejector was established and the flow of the adjustable ejector was simulated by FLUENT on different spindle positions. The experimental results indicate that the axial pressure of an adjustable ejector increases linearly in the constant area mixing section, sharply in the beginning of diffuser section and then slowly in the other sections of diffuser. The velocity of flow in the mixing section differs significantly at the axis and boundary. The movement of spindle into the nozzle makes the position of shock wave upstream and motive flow rate decreases.

Key words: ejector; nozzle; adjustable; supersonic; flow